



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILI KILPELÄINEN
PASSIIVINEN KESKEISMODULAATIO SISÄTILA-RADIOVER-
KOISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Mikko Valkama
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 9. joulukuuta 2015

TIIVISTELMÄ

VILI KILPELÄINEN: Passiivinen keskeismodulaatio sisätila-radioverkoissa
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 66 sivua, 4 liitesivua
Maaliskuu 2016
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Langaton tietoliikennetekniikka
Tarkastaja: professori Mikko Valkama

Avainsanat: Passiivinen keskinäismodulaatio, hajautettu antennijärjestelmä, sisäverkon suunnittelu, antennit, antennin säteilyteho,

Energiankulutuksen vähentäminen ja uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käyttö rakennusalailla ovat tällä hetkellä tärkeitä toimenpiteitä. Käytännössä tämä näkyy rakentamisessa tiukentuneina energiatehokkuusvaatimuksina. Radiotaajuuksien näkökulmasta katsottuna tämä ilmenee kehittyneinä rakennusmateriaaleina, jotka sisältävät erilaisia metallipinnoitteita – tai kerroksia. Edellä mainittujen seikkojen johdosta, voidaan tehdä päätelmä, että asuinrakennusten kattavaan peittoon ja tulevaisuuden kasvaviin kapasiteettivaatimuksiin pystytään vastaamaan vain rakennusten sisäisillä antenniverkoilla, niin sanotuilla DAS-järjestelmillä (*Distributed Antenna System*).

Tutkimuksen mittaukset koostuivat kolmesta selkeästä osakokonaisuudesta, joista kaikista suoritettiin omat mittaukset: Peittomittaukset, passiivisen keskinäismodulaation mittaukset ja antennin säteilytehon mittaukset. Edellä mainitut kolme osa-aluetta liittyvät vahvasti toisiinsa ja luovat selkeän kokonaisuuden.

Peittomittausten tavoitteena oli tarkoitus arvioida sisäverkon antennien erilaisten sijoituspaikkojen vaikutusta asuinkerrostalojen eri huoneistojen signaalitasoihin. Tutkimuksessa kalibroitiin kenttämittausten avulla kaupallinen simulaattori, jonka avulla havaittiin, että Säteilyturvakeskuksen rajoittamalla 33 dBm lähetysteholla saadaan yhden asuinkerroksen kattava peitto.

Passiivisen keskinäismodulaation tutkimuksessa oli tarkoituksena mitata todellisen verkon PIM-arvoja käyttämällä sisäverkkojen verkonrakennuksessa tavallisimmin asennettavia komponentteja sekä löytää suosituksia antennien valintaan ja asennustapaan PIM-särön välttämisen näkökulmasta. Tutkimuksessa havaittiin, että käytävän leveys ja antennin lähikentässä oleva metallinen materiaali vaikuttavat merkittävästi PIM-arvon suuruuteen. Tulosten perusteella löydettiin viitteellinen antennin sijoituspaikkaohje, jonka perusteella antenni tulisi kapealla käytävällä (alle 160 cm leveä) sijoittaa 0-20 cm etäisyydelle käytävän välikatosta ja seinästä. Leveällä käytävällä (yli 160 cm leveä) antenni tulisi sijoittaa 15-30 cm etäisyydelle katosta ja 10-30 cm etäisyydelle seinästä.

Antennin säteilytehon mittausten tutkimuksen osassa oli tarkoitus arvioida nykypäivänä suunniteltavien DAS-sisäverkkojen yksittäisten antennien todellista säteilytehoa. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että antennin hyötysuhde on keskimäärin noin 80 %. Lisäksi antennin sijoittaminen sisätiloihin laskee tätä arvoa, sillä antennin lähikentässä oleva metallinen materiaali vaikuttaa negatiivisesti antennin ominaisuuksiin. Mittaustulosten perusteella saatiin selville, että mittauksissa käytetyillä antennilla syöttötehon tulisi olla 2,23–2,80 W, mikäli halutaan saavuttaa 2 W säteilyteho.

ABSTRACT

VILI KILPELÄINEN: Passive Intermodulation in Indoor Radio Networks

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 66 pages, 4 Appendix pages

March 2016

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Wireless communication

Examiner: Professor Mikko Valkama

Keywords: Passive intermodulation, distributed antenna system, indoor radio network planning, antennas, antenna power

The reduction of energy consumption and the use of energy from renewable sources within the construction industry are important measures at the moment. In practice, this leads in stricter building energy efficiency requirements. From radio frequency perspective this is reflected in advance building materials which contain a variety of metallic coatings or metallic layers. A conclusion can be made due to the above mentioned issues that to offer a good enough coverage for a one floor and to meet the growing capacity demands in the future the only option is to build indoor radio networks (*Distributed antenna system*).

The study consists of three individual measurements: Indoor coverage measurements, passive intermodulation measurements and antenna radiation power measurements. Above mentioned three areas are strongly related and creates a clear entity.

The objective of indoor coverage measurements was to evaluate the impact of different antenna mounting positions to signal levels at different apartments. A commercial planning software was calibrated by the field measurements. Based on the simulation results it was found that a one floor coverage was reached using just one antenna when 33 dBm transmit power, restricted by Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), was used.

The objective of passive intermodulation measurements was to measure the actual PIM-values using currently the most common indoor components, as well as to find recommendations for the selection and installation of antennas. It was found that the corridor width and metallic material in antennas near field impacts greatly to PIM-values. Based on the measurement results it was found an antenna placement guide. In a narrow corridor (width less than 160 cm) an antenna should be placed 0-20 cm from the ceiling and wall. In a wide corridor (width more than 160 cm) an antenna should be placed 15-30 cm from the ceiling and 10-30 cm from the wall.

The aim in antenna radiation power measurement part was to estimate the real radiation power of individual antenna in DAS-systems. According to the results it can be said that the efficiency of antenna was approximately 80 %. In addition, when the antenna is placed indoor the efficiency of the antenna is reduced due to the fact that the metallic material in antennas near field decreases antennas characteristics. Based on the measurement results, using the test antennas, the antenna input power should be between 2,23–2,80 W if 2,00 W radiation power is desired to reach.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan laitoksella yhteistyössä DNA:n, Elisan ja Soneran kanssa. Edellä mainitut operaattorit ovat myös toimineet työn rahoittajina.

Työn tekemistä helpotti huomattavasti tohtorikoulutettava Ari Asp, joka oli tehnyt kattavan pohjatyön tutkimukselle ja suunnitellut tutkimuksen alustavan rakenteen. Ari Asp toteutti lisäksi peittomittausten yhteydessä suoritettua rakenteiden vaimennusmittaukset, joiden avulla tutkimuksessa käytetty simulaattori kalibrointiin.

Tahdon esittää erityiset kiitokset Ari Aspille rakentavasta ja määrätietoisesta ohjauksesta, jonka avulla opinnäytetyön tekeminen onnistui. Tutkimuksen suorittaminen ei olisi ollut mahdollista ilman mittavälineiden lainaamista ja pääsyä mittaushaasteina olleisiin kerrostaloihin. Haluan kiittää kaikkia niitä henkilöitä, jotka mahdollistivat edellä mainitut asiat. Lisäksi haluan esittää lämpimät kiitokset kaikille läheisilleni ja ystävilleni kaikesta kannustuksesta ja tuesta sekä tämän työn että opintojeni aikana.

Tampereella, 12.2.2016

Vili Kilpeläinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TEOREETTINEN TAUSTA	5
2.1	Sisäverkon toteutusmahdollisuudet.....	5
2.1.1	Hajautettu antennijärjestelmä.....	5
2.1.2	Säteilevä kaapeli	7
2.2	Passiivinen keskinäismodulaatio.....	8
2.2.1	Keskinäismodulaation tuotteet.....	9
2.2.2	Kolmannen asteen harmonisen teho	10
2.2.3	Passiivisen keskinäismodulaation lähteet	11
2.3	Antennien peruskäsitteitä	12
2.3.1	Antennin lähi – ja kaukokenttä	13
2.3.2	Säteilykuvio	13
2.3.3	Keilan pinta-ala	15
2.3.4	Keilan hyötysuhde.....	16
2.3.5	Antennin suuntaavuus ja vahvistus	16
2.3.6	Tehollinen pinta-ala	17
2.3.7	Kaistanleveys	17
2.3.8	Vapaan tilan eteneminen.....	18
2.3.9	Vastaanottimen kohinataso	18
3.	MITTAUKSET	20
3.1	Mittausmenetelmät ja laitteet	20
3.2	Peittomittausten tulokset	25
3.2.1	Mittauskohde 1.....	25
3.2.2	Mittauskohde 2.....	27
3.2.3	Mittauskohde 3.....	29
3.3	Passiivisen keskinäismodulaation mittausten tulokset.....	31
3.3.1	Mittauskohde 4.....	33
3.3.2	Mittauskohde 5.....	37
3.3.3	Mittauskohde 6.....	39
3.3.4	Mittauskohde 7.....	42
3.3.5	Antennin heijastuskertoimen tarkastelu verkkoanalysaattorilla	46
3.4	Antennien tehomittausten tulokset	47
4.	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	50
4.1	Antennien sijoituspaikan vaikutus	50
4.2	Antennien määrä	54
4.2.1	Mittauskohteen 1 peitto 1-3 antennilla 2100 MHz:n taajuudella...	55
4.2.2	Mittauskohteen 3 peitto 1-3 antennilla 2100 MHz:n taajuudella...	58
4.3	Tulosten luotettavuus	61
5.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	64
	LÄHTEET.....	65

LIITE A: Galtronics Pear S5491i

LIITE B: Huber+Suhner Sencity Ultra

LIITE C: Kathrein 80010465

LIITE D: Kathrein 80010709

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BWFN	Beamwidth between first nulls
DAS	Distributed Antenna System
dB	Desibel
dBc	Decibels relative to the carrier
dBm	Desibelimilliwatt
DPM	Dominant Path Model
EIRP	Effective Isotropically Radiated Power
GSM	Global System for Mobile Communications
HPBW	Half Power Beamwidth
IM3	Third order intermodulation product
LNA	Low noise amplifier
PIM	Passive intermodulation
RF	Radio frequency
SNR	Signal to Noise Ratio
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VNA	Vector Network Analyser
VSWR	Voltage standing wave ratio

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos ja siihen vaikuttavien kasvihuonepäästöjen lisääntyminen on tunnettu tosiasia. Tilanteen kehittymisestä on oltu huolestuneita jo vuosikymmeniä, mutta ensimmäiset sopimuksen ratifioineita jäsenmaita sitovat ja selkeät tavoitteet asetettiin päästöjen vähentämiseksi vasta Kioton sopimuksessa 1997. Sopimuksen allekirjoittamisen jälkeen muun muassa EU:n on täytynyt aloittaa toimenpiteet päästöjen rajoittamiseksi. Euroopan komissio julkaisi 22.1.2014 vuoden 2030 ilmasto – ja energiapoliittisia tavoitteita koskevan toimenpidepaketin. Alla on listattu muutamia oleellisia tavoitteita [1]:

- Neuvoston päätösten perusteella kasvihuonekaasuja tulee vähentää vähintään 40 % EU:n sisäisin toimin (verrattuna vuoden 1990 päästöihin).
- Uusiutuvan energian osuus tulee nostaa EU-tasolla vähintään 27 %:iin.
- Energiatodokkuutta tulee parantaa EU-tasolla vähintään 27 %:ia.

Rakennusten energiatodokkuus on jatkuvan tarkkailun ja kehityksen kohteena, koska EU:n alueella noin 40 % kokonaisenergian kulutuksesta tapahtuu rakennuksissa [2]. Energiankulutuksen vähentäminen ja uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käyttö rakennusalaalla ovat näin ollen tärkeitä toimenpiteitä. Käytännössä tämä näkyy rakentamisessa tiukentuneina energiatodokkuusvaatimuksina.

Radiotaajuuksien näkökulmasta katsottuna tämä ilmenee kehittyneinä rakennusmateriaaleina, jotka sisältävät erilaisia metallipinnoitteita – tai kerroksia. Tämä on nähtävissä muun muassa rakennusmateriaalien lämmönläpäisykertoimista (U-arvo tai K-arvo), jotka pakottavat esimerkiksi ikkunanvalmistajat käyttämään selektiivipinnoitteita kaikissa lämmitettäviin tiloihin tarkoitetuissa tuotteissaan. Metallipinnat puolestaan aiheuttavat tunnettuja ongelmia radiosignaaleille. Mittausten perusteella on havaittu, että uusien rakennusmateriaalien johdosta lisävaimennusta syntyy 10–20 dB verrattuna vanhojen standardien perusteella rakennettuihin taloihin sekä GSM (*Global System for Mobile Communications*) – että UMTS-taajuuksilla (*Universal Mobile Telecommunications System*) [3, s. 6]. Riittävän signaalitason tarjoaminen sisätiloihin on rakennuksen ulkopuolisilla makrosoluilla jatkossa aina vain haasteellisempaa.

Edellä mainittujen seikkojen johdosta, voidaan tehdä päätelmä, että asuinrakennusten kattavaan peittoon ja tulevaisuuden kasvaviin kapasiteettivaatimuksiin pystytään vastaamaan vain rakennusten sisäisillä antenniverkoilla, niin sanotuilla DAS-järjestelmillä (*Distributed Antenna System*). DAS-verkoissa on kuitenkin havaittu olevan sisäverkon toimintaan liittyviä ongelmia ja häiriöitä, jonka vuoksi niiden suunnitteleminen ja toteuttaminen nykyaikaisissa asuinrakennuksissa on haasteellista.

Radiotiellä esiintyvät häiriöt ovat hyvin laaja ja kompleksinen kokonaisuus, joten tässä tutkimuksessa aihe rajataan vain rakennusten sisäverkoissa esiintyviin passiivisten komponenttien keskinäismodulaation aiheuttamiin häiriöihin. Aiheen rajausta on merkityksellistä, sillä tällä rajauksella tutkimuksellinen pääpaino kohdistuu verrattain pieniä tehota-soja käyttäviin ja läpäiseviin komponentteihin sekä järjestelmiin. Tehorajoitus tulee suoraan Säteilyturvakeskuksen asettamista säteilytehorajoituksista, jotka määrittelevät muun muassa asuinrakennusten sisällä olevien antennien suurimmat sallitut EIRP-tehot (*Effective Isotropically Radiated Power*) riippuen kyseisen antennin asennuspaikasta, korkeudesta ja onko antennin välittömään läheisyyteen väestöllä vapaa pääsy [4, s. 7].

Tutkimus koostui kolmesta selkeästä osakokonaisuudesta, joista kaikista suoritettiin omat mittaukset. Alla on listattu tutkimuksessa tehdyt mittaukset:

- Peittomittaukset
- Passiivisen keskinäismodulaation mittaukset
- Antennin säteilytehon mittaukset.

Edellä mainitut kolme osa-aluetta liittyvät vahvasti toisiinsa ja luovat selkeän kokonaisuuden. Seuraavana on kerrottu tutkimuksen eri osa-alueiden tavoitteista.

Peittomittausten tavoitteena on tarkoitus arvioida sisäverkon antennien erilaisten sijoituspaikkojen vaikutusta asuinkerrostalojen eri huoneistojen signaalitasoihin. Tarkoituksena on selvittää kerrostason kattaminen yhdellä tai kahdella antennilla ainakin kahden edustavan uuden asuinkerrostalon tapauksessa.

Passiivisen keskinäismodulaation tutkimuksessa on tarkoitus mitata todellisen verkon PIM-arvoja (*Passive Intermodulation*) käyttämällä sisäverkkojen verkonrakennuksessa tällä hetkellä tavallisimmin asennettavia komponentteja sekä löytää suosituksia antennien valintaan ja asennustapaan PIM-särön välttämisen näkökulmasta.

Antennin säteilytehon mittausten tutkimuksen osassa on tarkoitus arvioida nykypäivänä suunniteltavien DAS-sisäverkkojen yksittäisten antennien todellista säteilytehoa. Taval-lisesti yksittäiset antennit palvelevat useamman operaattorin matkapuhelinverkkoja, ja ne tukevat eri teknologioiden käyttämiä taajuuskaistoja. Otettaessa huomioon eri teknologioiden kokonaissyöttötehot ja tavallisten antennien impedanssisovitus ja vahvistukset, on haastavaa arvioida säteilyturvakeskuksen määräysten mukaisen säteilyn enimmäistehon suhdetta verkon eri operaattoreiden ja eri teknologioiden vahvistimien syöttötehoon.

Kuten edellä mainittiin, tutkimuksen kolme osa-aluetta liittyvät selkeästi toisiinsa. PIM:ta tutkiessa saadaan selville mitkä olisivat antennien optimisijoituspaikat sisäver-kossa. Tämä rajaa tiettyjä alueita pois, jotka tulee ottaa huomioon tehdessä peittosuunnit-telua – ja optimointia. Toisaalta peittosuunnittelun kannalta antenni olisi useissa tapauk-sissa parempi sijoittaa keskelle asuinrakennusta eli asuinrakennuksen käytävän varrelle

ja mahdollisesti ahtaisiin tiloihin. PIM:n kannalta nämä alueet taas eivät ole hyviä antennin asennuspaikkoja. Antennin todellinen säteilyteho puolestaan on tärkeää siinä suhteessa, koska säteilyn määrä on rajoitettu lain puitteissa, niin syöttötehon tulisi olla sen suuruinen, että antennin säteilemä teho vastaa suunniteltua lähetystehoa. Asiat liittyvät siis liittyvät läheisesti toisiinsa, mutta luovat myös ristiriitoja toistensa välille.

Passiivista keskinäismodulaatiota mitattiin käyttäen kahdenlaisia PIM-mittareita, jotka olivat yhdistetty koaksiaalikaapelilla käytettyyn antennaan. Antenni oli asennettu kiinni teleskooppivarren päässä olevaan puiseen kiinnikkeeseen. Käytetyt PIM-mittarit lähettivät kaksi signaalia eri taajuuksilla (935 MHz ja 960 MHz). Tällöin IM3-komponentti (Kolmannen asteen harmoninen) syntyy taajuudelle 910 MHz. PIM-mittarit mittasivat vain IM3-komponentin tehoa. PIM-mittarien lähetystehon ylärajana käytettiin Säteilyturvakeskuksen asettamaa 33 dBm:n (*desibelimilliwatti*) säteilytehorajoitusta sisäverkon antenneille [4, s. 7]. Antennien paikkaa muutettiin jokaisen mittauksen välissä, jotta pystyttäisiin arvioimaan kuinka antennin sijoituspaikka vaikuttaa PIM-särön suuruuteen.

Peittomittauksissa mitattiin signaalin kuuluvuutta rakennuksen asuinkerroksen osalta GSM – ja UMTS-taajuuksilla. Lähetysantenni asetettiin mahdollisemman keskeiseen kohtaan asuinkerroksessa. Antenni oli kiinnitetty tukiasemaa simuloivaan laitteeseen, jonka avulla lähetettiin signaali mobiililaitteelle. Mobiililaitteen kanssa liikuttiin tämän jälkeen asuinkerroksessa ja tallennettiin vastaanotetun signaalin teho eri kohdissa kerrosta. Kun oltiin saatu selville rakennuksen todellinen peittokartta käytetyllä mittausjärjestelyllä, luotiin todellisia mittauksia vastaava tilanne kaupallisella simulaattorilla ja pyrittiin saamaan se vastaamaan saatuja mittaustuloksia. Simulaattorin lähtöarvoina käytettiin erikseen mitattuja rakennusmateriaalien vaimennusarvoja, jotta simulaattori vastaisi paremmin todellista mittaustilannetta. Kun simulaattori oli saatu toimimaan vaaditulla tarkkuudella, pystyttiin antennien paikkaa ja määrää muuttamaan simulaatiossa. Tämän avulla saatiin selville kuinka monta antennia yhden asuinkerroksen kattamiseen tarvitaan. Aiheesta on tehty jo aikaisemmin mittauksia, joissa on havaittu, että kun DAS-järjestelmässä lisätään antennien määrää, se parantaa peittoa ja tarjoaa tasaisemmin jakautuneen vastaanotetun signaalin tason, mutta ei paranna oleellisesti signaalin laatua [5, s. 5].

Antennin säteilemän todellisen säteilytehon selvittämisessä käytettiin antennien tutkimukseen suunniteltua simulaattoria. Simulaattorin avulla pystyttiin selvittämään antenniin syötetyn – ja vastaanotetun tehon suhdetta, josta saadaan laskettua antennin hyötysuhde. Antennin säteilyteho ei ole koskaan sama kuin syötetty teho, sillä muun muassa sisätiloissa antennin lähikentässä oleva materiaali vaikuttaa negatiivisesti antennin ominaisuuksiin. Tämä tarkoittaa, että muun muassa antennin suunniteltu säteilykuvio ja SWR saattavat muuttua merkittävästi.

Tämän tutkimuksen luvussa 2 luodaan teoreettinen tausta tuleville luvuille. Siinä luvussa esitellään sisäverkon toteutusmahdollisuuksista hajautettu antennijärjestelmä (DAS) ja säteilevä kaapeli. Luvussa 3 esitellään tutkimuksessa käytetyt mittausjärjestelyt ja laitteet

sekä esitellään kattavasti kaikki mittaustulokset. Mittaustulokset on eritelty edellä mainituista kolmesta osa-alueesta. Luvussa 4 analysoidaan mittaustuloksia sekä pyritään vastaamaan luvussa 1 esiteltyihin tutkimuskysymyksiin. Viimeisessä luvussa on pyritty tuomaan esille merkittävimmät tulokset ja johtopäätökset, joita tämän tutkimuksen avulla löydettiin.

2. TEOREETTINEN TAUSTA

Tässä luvussa luodaan teoreettinen tausta tutkimuksen ilmiöille. Luvussa esitellään kaksi vaihtoehtoa, joilla sisäverkkoja voidaan rakentaa. Lisäksi tuodaan esille passiivisen keskinäismodulaation ominaisuuksia ja valotetaan muun muassa PIM:n syntyä. Viimeisenä käsitellään muutamia antennien perusparametreja, jotka luovat perustan antennien toiminnan ymmärtämiselle.

2.1 Sisäverkon toteutusmahdollisuudet

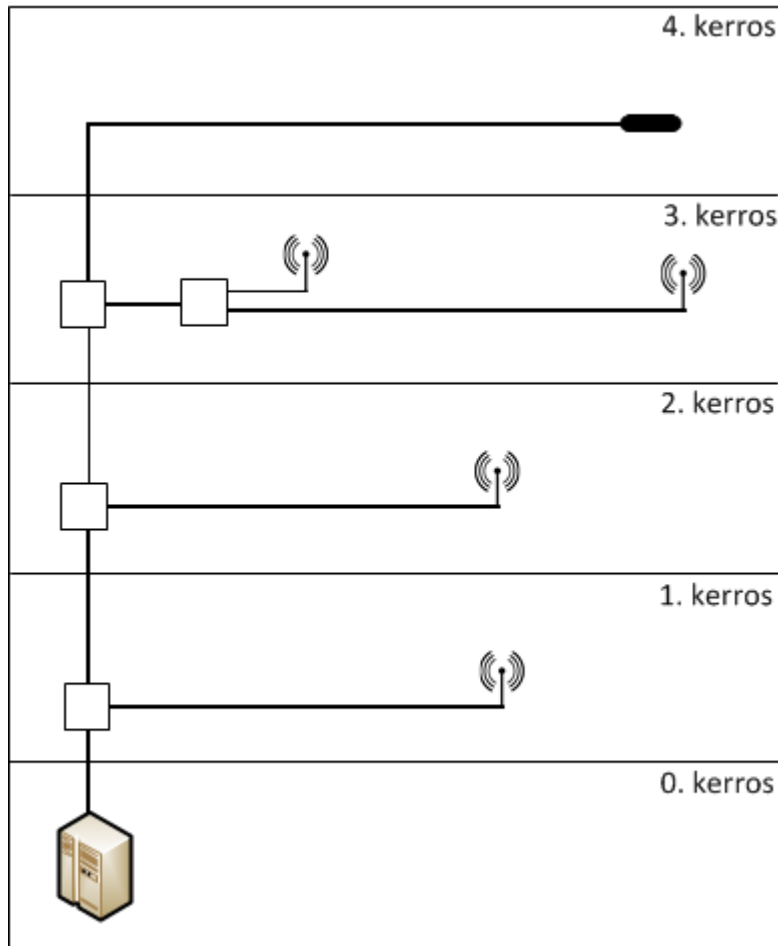
Nykypäivän tiukentuneet rakennusmääräykset ja parantunut energiatehokkuus ovat johtaneet siihen, että signaaliin eteneminen rakennuksiin on heikentynyt. Uudisrakentamisessa on alettu käyttää muun muassa energiatiiviitä selektiivilaseja. [3, s. 10] Aikaisemmin omakoti – ja kerrostaloissa radiosignaalien kannalta helpoin ja keskeisin etenemistie rakennuksen sisälle ovat olleet ikkunat. Selektiivilasi on energiansäästöön tarkoitettu ratkaisu, joka eroaa normaalista lasista siten, että lasin pinnalla on metallioksidikerroksia. Metallioksidikerroksien johdosta pitkäaaltoinen säteily heijastuu pois ja läpi pääsee vain lyhytaaltoinen säteily. Tämä nostaa energiatehokkuutta, sillä vain pieni osa lämmöstä pääsee säteilemään rakennuksen sisältä ulospäin. Radiosignaalin tiedetään läpäisevän heikosti metallia, joka johtaa siihen, että langattomien matkapuhelinjärjestelmien lähettämät signaalit eivät etene tehokkaasti sisä – ja ulkotilojen välillä.

Tässä luvussa esitellään kaksi ratkaisua, hajautettu antennijärjestelmä sekä säteilevään kaapeliin perustuva järjestelmä, joilla voidaan parantaa kuuluvuutta sisätiloissa, erityisesti kerrostaloissa. Molemmissa tapauksissa kerrostaloon rakennetaan sisäverkko rakennuksen sisälle asennettavien komponenttien avulla. Molemmilla tekniikoilla saadaan parannettua signaalin laatua (*quality*) ja peittoa (*coverage*).

2.1.1 Hajautettu antennijärjestelmä

Hajautetun antennijärjestelmän periaate on, että lähetetty teho jaetaan useamman antennin kesken, jotka on sijoitettu asuinrakennuksen eri tiloihin. Tämän avulla voidaan saavuttaa sama peitto kuin yhdellä antennilla, mutta käyttäen pienempää tehoa. Tähän päästään tehokkaalla peittosuunnittelulla ja huolellisella komponenttien valinnalla. Täytyy ottaa myös huomioon se, että kaapeli vaimentaa signaalia, erityisesti mikäli hajautettu antennijärjestelmä on suuri. [6, s. 73] Tämän takia järjestelmässä saatetaan myös käyttää vahvistimia (*LNA*). DAS:n on todettu parantavan sekä peittoa että kapasiteettia. Tulosten perusteella on havaittu, että UMTS:lla mobiililaitteen lähetystehoa voidaan pienentää jopa 6 dB antennien lisäämisellä [7, s. 4].

Kuvassa 2.1 on esitelty tilanne tyypillisestä DAS-verkosta. Kuvasta nähdään että 0. kerroksessa (kellari) on tukiasema, joka asetetaan lähettämään signaalia tarvittavalla teholla. Mikäli teho on liian suuri, se säteilee talon ulkopuolelle ja saattaa huonoimmassa tapauksessa häiritä rakennuksen ulkopuolisia makrosoluja ja täten tehdä turhia solunvaihtoja sisä – ja ulkosolujen välillä [6, s. 73].



Kuva 2.1. Periaatekuva hajautetusta antennijärjestelmästä.

Antennien sijoitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota, jotta voidaan taata tarpeeksi hyvä palvelun laatu (*Quality of Service*) ilman, että häiritään talon ulkopuolista verkkoa. Vastaanotetun signaalin tehon jakautuminen riippuu oleellisesti antennien sijoittelusta. Yleisesti ottaen yksi antenni tulee sijoittaa pääsisäänkäynnin läheisyyteen, jotta sisäverkko on selvästi voimakkaampi kuin ulkoverkko ja mobiililaitte tekee heti sisään tultua solunvaihdon sisäverkkoon. [6, s. 74] Antennien sijoittamisessa tulee myös ottaa huomioon antennin suuri sallittu säteilyteho. Mikäli yksi antenni ei pysty antennin sallitun säteilytehon puitteissa antamaan riittävän suurta peittoa, tulee antennien määrää luonnollisesti lisätä.

Hajautettuja antennijärjestelmiä voidaan toteuttaa kahdella periaatteella, passiivisella tai aktiivisella. Passiivinen järjestelmä on sellainen, joka sisältää ainoastaan passiivisia komponentteja. Aktiivinen järjestelmä puolestaan sisältää muun muassa vahvistimia, jotka tarvitsevat ulkopuolista tehoa.

Passiivisessa järjestelmässä tulee kiinnittää erityistä huomiota DAS-järjestelmässä syntyviin vaimennuksiin, sillä tässä järjestelmässä ei käytetä lainkaan vahvistimia. Passiivisessa järjestelmässä käytetään yleensä seuraavanlaisia komponentteja: koaksiaali-kaapeli, signaaliyhdistin (*signal combiner*), tehonjakaja (*splitter, tapper*), antenni ja vaimennin (*attenuator*). Nämä komponentit eivät tarvitse toimiakseen ulkopuolista tehoa, vaan ainoastaan sisääntulosignaalin. Koaksiaali-kaapeli, joka tuo tehoa tukiasemalta, on halkaisijaltaan yleensä melko suuri passiivisessa DAS:ssa. Sen avulla voidaan vähentää kaapelihäviöitä, joita syntyy kun signaalia viedään ylempiin kerroksiin (*vertical distribution*). Ohuempia, mutta enemmän vaimentavia koaksiaali-kaapeleita käytetään antennien asentamiseen kerroksiin, sillä niitä on helpompi käsitellä (*horizontal distribution*). Tehonjakajia ja vaimentimia puolestaan käytetään, että teho saataisiin jaettuja mahdollisimman tasapuolisesti kaikkien lähettävien sisääntennien kesken. Asunnon koon kasvaessa vaimennukset saattavat kasvaa niin suuriksi, että vaadittua peittoa ei enää saavuteta. Tämän vuoksi passiivisia DAS-järjestelmiä asennetaan ainoastaan keskisuuriin rakennuksiin. Rakennukset, joissa palvelua tarjoavat useammat operaattorit, on 0. kerrokseen sijoitettu useampi tukiasema, josta viedään signaali DAS-antenneille. Monioperaattoriverkoissa tulee huomioida, että signaaliyhdistin on tarpeeksi laadukas ja että saadaan luotua tarpeeksi eristystä signaalien välille, etteivät signaalit pääse sekoittumaan ja luomaan ylimääräisiä taajuuskomponentteja. [8, s. 311] Voidaan kuitenkin todeta, että PIM:a on kaikissa nykyaikaisissa sisäverkoissa. Sen suuruus pyritään kuitenkin minimoimaan, mikäli se vain on mahdollista.

Kun passiivisen DAS-järjestelmän häviöt kasvavat liian suuriksi, tarvitaan aktiivisia vahvistimia, jota käytetään sekä ylä – että alalinkin suuntaan. Tällöin puhutaan aktiivisesta DAS-järjestelmästä. Ylälinkin vahvistimet sijoitetaan yleensä lähelle antennia, jolloin pyritään minimoimaan järjestelmän kohinaluku (*noise figure*). [8, s. 313] Kohinaluku on sisäänmenon SNR:n (*Signal to Noise ratio*) ja ulostulon SNR:n suhde. Ylälinkin vahvistukseen käytetään yleensä LNA:ta (*Low Noise Amplifier*), sillä vastaanottimen etuosan kohinalla on suurin vaikutus koko systeemin kohinalukuun. Alalinkin vahvistimet voidaan sijoittaa järjestelmässä hajautetummin koko järjestelmän alueelle [8, s. 313].

2.1.2 Säteilevä kaapeli

Säteilevän kaapelin (*Radiating cable*) periaatteena sisäverkon peiton saavuttamisessa on se, että koko rakennukseen asennetaan kaapeliverkosto käyttäen erityistä kaapelointia. Kaapeli säteilee ulkovaipassa olevista pienistä rei'istä. [8, s. 75] Kuvassa 2.1 on havainnollistettu miten säteilevä kaapeli voidaan asentaa rakennukseen (4. kerros). Säteilevän kaapelin asennuksessa täytyy ottaa huomioon, että kaapeli tulee asentaa kaikkialle, minne

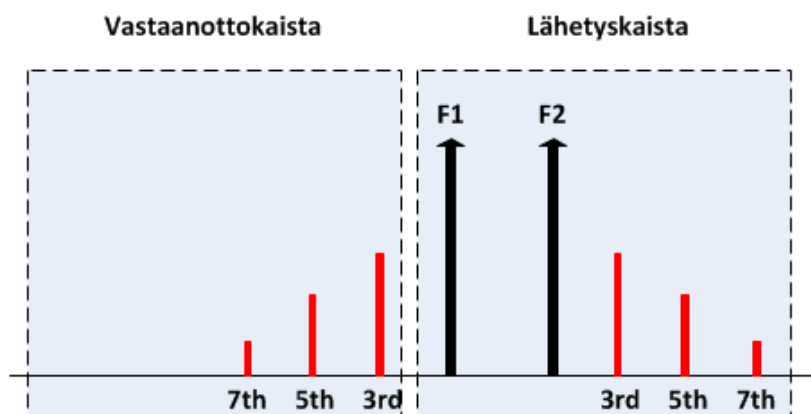
signaalin halutaan kuuluvan. Lisäksi kaapeli tulisi eristää riittävän hyvin metallisista kaapelihyllyistä ja muista kaapeleista, etteivät ne pääse vaikuttamaan säteilevän kaapelin säteilyominaisuuksiin.

Säteilevää kaapelia käytetään muun muassa silloin kun tarpeeksi hyvää peittoa on vaikea saavuttaa perinteisiä antennoja käyttäen. Tämänkaltaisen tilanne on esimerkiksi erittäin pitkä käytävä tai tunneli. Säteilevä kaapeli sopii myös hyvin järjestelmiin, jossa tarvitaan tuki useamman operaattorin toiminnalle, sillä säteilevällä kaapelilla on usein laaja kaistanleveys. Tutkimuksissa on huomattu, että säteilevällä kaapelilla voidaan saavuttaa tasaisempi peitto kuin antennilla sekä hyvä signaalitaso peiton alueella, mutta se vaatii erityisen tiheää kaapelointia [5, s. 5].

2.2 Passiivinen keskinäismodulaatio

Sisäverkoissa käytetään usein passiivisia komponentteja, koska niiden huolto ja ylläpito on helppoa. Tämän vuoksi sisäverkon kokonaiskulut laskevat selvästi. Passiivista keskeismodulaatiota on havaittu tapahtuvan juuri näissä komponenteissa. Passiivisten komponenttien katsotaan olevan lineaarisia eli sisään – ja ulostulolla on lineaarinen yhteys. Passiiviset komponentit luovat kuitenkin ylimääräisiä taajuuskomponentteja (*intermodulation products*), mikäli käytetty teho on tarpeeksi korkea [9, s. 10].

Käytössä oleva taajuusalue on rajallinen ja tämän takia se tulee käyttää hyväksi mahdollisemman tehokkaasti. Tämä johtaa usein siihen, että taajuuskanavat sijoitetaan hyvin lähelle toisiaan. Taajuuskanavien ollessa lähellä toisiaan kasvaa todennäköisyys siihen, että ne häiritsevät toisiaan [9, s. 12]. Tämän takia on todennäköistä, että keskinäismodulaation luomat ylimääräiset taajuuskomponentit sijoittuvat muiden järjestelmien käyttämille taajuusalueille. Ongelma on havaittavissa erityisesti silloin kun ylimääräisen taajuuskomponentin teho on paljon korkeampi kuin sen häiritsemä signaali. Tämän kaltaisen tilanne on esimerkiksi se, että lähetys-signaaleista (TX) syntyvät keskinäismodulaatio tuotteet osuvat toisen systeemin vastaanottokaistalle (RX). Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Keskinäismodulaation tuotteiden osuminen antennin vastaanottokaistalle.

2.2.1 Keskinäismodulaation tuotteet

Jotta ymmärretään, että mistä ylimääräiset taajuuskomponentit syntyvät ja mille taajuuksille, tutkitaan asiaa lyhyen esimerkin avulla. Tarkastellaan yksinkertaistettua tilannetta, jossa epälineaariseen komponenttiin syötetään kaksi moduloimatonta signaalia f_1 ja f_2 kaavan 2.1 mukaisesti:

$$V_i = V_1 \cos(2\pi f_1 t) + V_2 \cos(2\pi f_2 t), \quad (2.1)$$

jossa V_i on ulostulosignaali ja V_1 ja V_2 ovat signaalien f_1 ja f_2 amplitudit. Epälineaarisen komponentin siirtofunktio voidaan esittää n :nnen asteen potenssisarjana:

$$V_o = K_1 V_i + K_2 V_i^2 + K_3 V_i^3 + \dots + K_n V_i^n, \quad (2.2)$$

jossa V_o on ulostulosignaali ja K on kerroin, joka riippuu epälineaarisen komponentin ominaisuuksista. [10, s. 110]

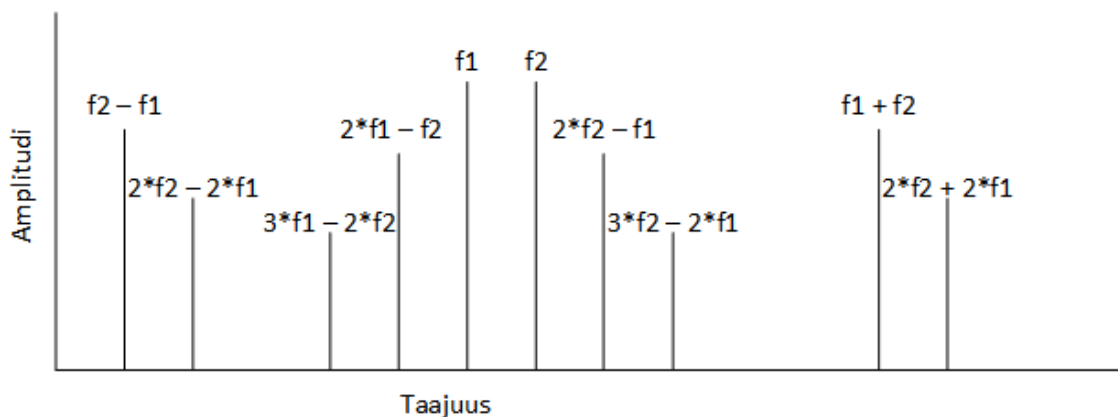
Sijoittamalla kaavan 2.1 ulostulosignaali V_i kaavaan 2.2 ja sieventämällä se, saadaan V_o :n spektri. Syntyneiden keskinäismodulaatio tuotteiden taajuudet voidaan selvittää kaavan 2.3 avulla:

$$f_{IM} = \pm m f_1 \pm n f_2, \quad (2.3)$$

jossa f_{IM} on taajuus, jolle keskinäismoduulatiota syntyy ja m sekä n ovat kokonaislukuja. Ylimääräisten taajuuskomponenttien aste voidaan määrittää seuraavalla tavalla [10, s. 110]:

$$N = m + n. \quad (2.4)$$

Kuvasta 2.3 nähdään taajuudet f_1 ja f_2 sekä osa syntyneistä keskinäismodulaation taajuuskomponenteista.



Kuva 2.3. Passiivisen keskeismodulaation synnyttämät taajuudet taajuuksilla f_1 ja f_2 .

Yleisesti ottaen IM-taajuuskomponenteista ongelmallisempia ovat parittoman asteiset, koska parillisten asteiden komponentit voidaan helposti suodattaa pois. [9, s. 14] Tämä on havaittavissa kuvasta 2.3, josta nähdään, että parillisten asteiden taajuuskomponentit ovat taajuusakselilla huomattavasti kauempana alkuperäisistä signaaleista f_1 ja f_2 kuin parittomien asteiden taajuuskomponentit. Tämän vuoksi parillisten asteen komponentit on helppo poistaa sopivan suotimen avulla. IM-komponenttien amplitudi laskee asteen kasvaessa, joten tästä voidaan havaita, että ongelmallisin ja eniten haittaa aiheuttava taajuuskomponentti on kolmannen asteen harmoninen. Yleensä kun järjestelmissä selvitetään passiivisen keskinäismodulaation suuruutta, tutkitaan pääasiassa kolmatta harmonista. Tämä johtuu siitä, että se on lähimpänä käytettyjä taajuuksia sekä se on muita tehollisesti suurempi signaali. Mikäli IM3:n teho on hyvin korkea, voidaan olettaa, että myös korkeampi asteisten keskinäismodulaatiotuotteiden teho on kasvanut häiritsevän suuriksi. Tällöin tulisi ottaa huomioon myös viides – ja seitsemäs harmoninen. Tämä johtuu siitä, että IM-komponenttien kaistanleveys kasvaa asteen kasvaessa. Esimerkiksi jos lähetettyjen signaalien f_1 ja f_2 kaistanleveys on 1 MHz, IM3:n kaistanleveys on 3 MHz, IM5:n kaistanleveys on 5 MHz ja niin edelleen. Tämän takia korkeamman asteiset komponentit osuvat suuremmalla todennäköisyydellä toisten järjestelmien taajuusalueiden alueelle.

2.2.2 Kolmannen asteen harmonisen teho

Edellisessä alaluvussa todettiin, että kolmannen asteen harmoninen on keskinäismodulaatio tuotteista haasteellisin. Tämän komponentin tehon suuruus on täten merkittävä tekijä. Tarkastellaan sen tehoa suhteessa lähetettyjen signaalien tehoon. Sijoitetaan kaava 2.1 kaavaan 2.2 ja ratkaistaan se kaikkien keskinäismodulaatio – ja harmonisten komponenttien V_o suhteen, niin saadaan selville IM3:n teho:

$$V_{IM3} = \frac{3}{4}(k_3 V_1^2 V_2) \cos[2\pi(2f_1 - f_2)t]. \quad (2.5)$$

Tämä voidaan vielä sieventää muotoon:

$$V_{IM3} \sim V_1^2 V_2, \quad (2.6)$$

sillä V_1 ja V_2 ovat suuria arvoja verrattuna lausekkeen 2.5 muihin arvoihin. Kaava 2.6 voidaan ilmoittaa vielä tehona muodossa:

$$P_{IM3} \sim P_1^2 P_2, \quad (2.7)$$

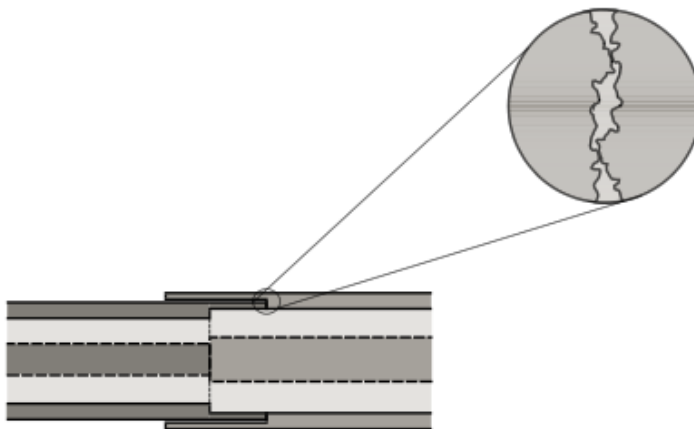
missä P_1 ja P_2 ovat lähetettyjen signaalien f_1 ja f_2 tehot ja P_{IM3} on kolmannen asteen harmonisen teho. [11, s. 2624] Kaavasta 2.7 voidaan siis havaita, että mikäli molempien signaalien tehoa kasvatetaan 1 dB, IM3:n teho kasvaa 2 dB (2 dB/dB). Käytännössä on kuitenkin havaittu IM3:n tehon kasvavan 1,5-2,5 dB/dB [12].

2.2.3 Passiivisen keskinäismodulaation lähteet

Passiivisen keskinäismodulaation lähteet jaetaan perinteisesti kahteen eri kategoriaan: materiaalien – ja kontaktien epälineaarisuuksiin. [9, s. 19] Näiden ilmiöiden takia lineaarinen komponentti saattaa tuottaa epälineaarisuuksia tai toimia epälineaarisesti. Edellä mainittujen asioiden lisäksi on havaittu, että antennin ympäristöllä on myös vaikutusta passiivisen keskinäismodulaation suuruuteen. Antennin sijoituspaikan läheisyydessä olevat materiaalit saattavat vaikuttaa antennin toimintaan, niin että ne muuttavat antennin suunniteltuja ominaisuuksia. Erityisesti antennin lähikentässä olevat metallia sisältävät materiaalit ovat haitallisia.

Sekä dielektriset että metalliset materiaalit voivat aiheuttaa passiivista keskinäismodulaatiota, jos ne käyttäytyvät epälineaarisesti. Dielektrisillä materiaaleilla kuten muovilla tätä ongelmaa ei yleensä kuitenkaan ole. Metalliset materiaalit sekä niistä erityisesti ferro – ja ferrimagneettiset materiaalit (esim. rauta, koboltti, nikkeli) ovat puolestaan jo haitallisia. Sekä ferro – että ferrimagneettisilla materiaaleilla on epälineaarinen magneettivuon tiheys muuttuvassa magneettikentässä [9, s. 22]. Kun näitä kahta materiaalia on käytetty sisäverkon komponenteissa, on niiden havaittu aiheuttavan huomattavaa keskinäismodulaatiota. Molemmissa tapauksissa PIM-arvot ovat olleet yli -100 dBm lähetystehon ollessa 2x48 dBm. [9, s. 23]

Kontaktit ovat erittäin kriittisiä PIM:n tarkastelussa, koska sähkövirran tiheys on erittäin korkea näissä paikoissa. Kontaktien pinnat eivät kuitenkaan ole koskaan täysin tasaisia mikroskooppisella tasolla. Tämän vuoksi materiaalit eivät milloinkaan kosketa toisiaan koko kontaktin pinta-alalta. [9, s. 19] Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.4. Tästä seuraa, että kontaktit tulisi kiinnittää toisiinsa juuri oikean vahvuksella voimalla. Kaikilla PIM-kriittisillä liittimillä on ilmoitettu kiinnitysmomentti, jota tulee käyttää laitteiden asentamisessa. Lisäksi järjestelmän ympäristön (kaapelin läheisyydessä oleva tila) tulisi olla vakaa, jotta kontaktit pysyvät paikallaan.



Kuva 2.4. Liittimen pinnan tarkastelu mikroskooppisella tasolla. [9, s. 20]

Tutkimuksen mittauksia tehdessä havaittiin, että antennin ympäristö ja sitä ympäröivät materiaalit kasvattavat PIM:n suuruutta alueella, jossa PIM on ongelmallista. Antenni kiinnitetään yleensä sisäverkoissa johonkin elementtiin katon tai seinän läheisyydessä, kuten esimerkiksi välikattoon. Tämän johdosta antennin lähikentässä on oletusarvoisesti huomattava määrä metallia. Välikaton alla on muun muassa eristettyjä vesiputkia ja sähköhylyjä. Lisäksi havaittiin, että PIM-arvoon vaikutti myös käytävän leveys. Ahtaassa tilassa PIM-arvot olivat korkeampia kuin vapaassa tilassa.

2.3 Antennien peruskäsitteitä

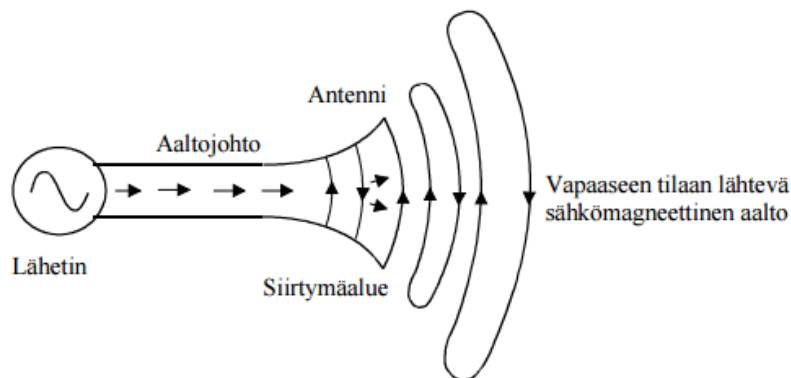
Antenni on elementti, jonka avulla aaltojohdossa kulkeva ohjattu sähkömagneettinen aalto muunnetaan vapaassa tilassa eteneväksi aalloksi. Antennin toiminnan perusperiaate on sama riippumatta antennin tyypistä. Säteilyn lähteenä on ajan funktiona muuttuva virta. Kaavan 2.8 avulla voidaan havainnollistaa antennin säteilyä:

$$I(t)L = Qv(t), \quad (2.8)$$

missä

- $I(t)$ on ajan funktiona muuttuva virta
- L on virta elementin pituus (esim. johdin)
- Q on varaus
- $v(t)$ on kiihtyvyyden muutos, joka on sama kuin virran kiihtyvyys. [13, s. 12]

Antenni muuttaa virran valon nopeudella eteneviksi sähkö – ja magneettikentiksi. [8, s. 61] Antennilla pyritään lähettämään ja vastaanottamaan sähkömagneettista säteilyä. Antennilla avulla aaltojohdoissa kulkeva lähetysteho pyritään siirtämään mahdollisemman tehokkaasti vapaaseen tilaan ja päinvastoin [8, s. 61]. Kuvassa 2.5 on esitelty lähetysantennin toimintaa, jossa 1-dimensioinen aalto on muunnettu vapaassa tilassa kulkeväksi aalloksi. Vastaanottoantenni toimii samalla periaatteella, mutta toiseen suuntaan.



Kuva 2.5. Lähetysantennin perusperiaate.

2.3.1 Antennin lähi – ja kaukokenttä

Lähi – ja kaukokenttä ovat alueita, jotka syntyvät sellaisien objektien ympärille, joilla on sähkömagneettinen kenttä. Tällainen objekti on esimerkiksi antenni. Alueet erotetaan toisistaan, sillä niiden ominaisuudet eroavat huomattavasti toisistaan. Antennin säteily on täten erilaista kyseisillä alueilla, joka tulee ottaa huomioon muun muassa antennin asennuspaikan valinnassa.

Antennin säteilykuvio muuttuu nopeasti lähellä antennia etäisyyden funktiona. Antennin lähellä on sekä säteily – että reaktiivista energiaa, joka säteilee antenniin päin ja siitä poispäin. Reaktiivisella kentällä ei ole merkitystä kauempana antennista ja tällä alueella säteilyä on vain poispäin antennista. Lähi – ja kaukokenttä voidaan erottaa toisistaan Rayleighin kriteerin mukaan:

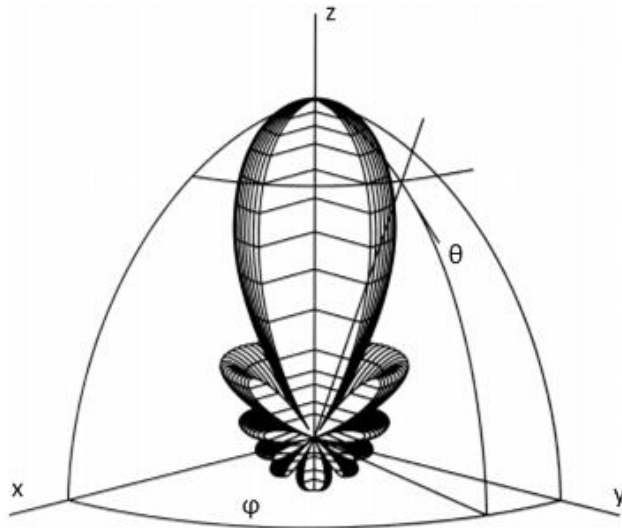
$$R = \frac{2L^2}{\lambda}, \quad (2.9)$$

jossa L on antennin suurin dimensio, λ on aallonpituus ja R on alueet erottava säde. Kaikkien edellä mainittujen muuttujien yksikkö on metri. Säteen R sisäpuolella kyseessä on lähikenttä ja ulkopuolella kaukokenttä. [8, s. 63]

Antennin sijoituspaikkaa miettiessä tulee erityisesti kiinnittää huomiota antennin lähikentässä olevan materiaalin määrään. Optimitilanteessa antennin lähikenttä on täysin vapaa kaikesta materiaalista, sillä ne saattavat kytkeytyä antennin sähkö – ja magneettikenttään ja muuttaa niitä. Tämä puolestaan saattaa vaikuttaa huomattavasti antennin ominaisuuksiin, kuten muuttaa antennin alkuperäistä säteilykuviota sekä impedanssia.

2.3.2 Säteilykuvio

Antennin säteilykuviot ovat 3-ulotteisia kuvia ja määreitä, jotka kuvaavat muutosta antennin tehokentässä napakoordinaattien θ ja ϕ funktiona. Kuvassa 2.6 on 3-ulotteinen kuva antennin säteilykuvioista. Antennilla on pääkeila z-akselin suuntaan, johon se säteilee eniten ja sivukeiloja muihin suuntiin.



Kuva 2.6. 3-ulotteinen kuva antennin säteilykuvioista.

Mistä tahansa säteilykuvioista voidaan piirtää 3-ulotteinen säteilykuvio samoin kuin kuvassa 2.6. Säteilykuvio voidaan kuitenkin esittää myös 2-ulotteisena. Tässä tapauksessa tarvitaan kaksi kuvaa, kuva antennin kentästä sekä tehosta. Näistä kuvista voidaan nähdä kaksi antennin kuvion kannalta tärkeää parametria: puolitehon keilanleveys (*half-power beamwidth, HPBW*) ja ensimmäisten nollakohtien välinen keilanleveys (*beamwidth between first nulls, BWFN*). [13, s. 14] HPBW on niiden kulmien erotus, joissa tehon säteilykuvion teho pääkeilassa on puolet maksimista eli pudonnut 3 desibeliä. BWFN on niiden kulmien erotus, joissa teho putoaa nollaan.

Kun säteilykuvio jaetaan sen maksimiarvolla, saadaan normalisoitu säteilykuvio, joka on arvo millä ei ole yksikköä. Normalisoitu säteilykuvio sähkökentälle voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\text{Normalisoitu säteilykuvio} = E_{\theta}(\theta, \phi)_n = \frac{E_{\theta}(\theta, \phi)}{E_{\theta}(\theta, \phi)_{\max}}. \quad (2.10)$$

Säteilykuvion muoto on usein riippumaton etäisyydestä, kun etäisyydet ovat suuria verrattuna antennin kokoon ja aallonpituuteen. Tästä johtuen antennikuvioita tarkastellaan silloin kun ollaan kaukokentän alueella. [13, s. 17]

Säteilykuviot voidaan esittää myös tehona pinta-alayksikkö kohti. Jakamalla tämä teho tehon maksimiarvolla saadaan normalisoitu tehokuvio

$$\text{Normalisoitu tehokuvio} = P_n(\theta, \phi)_n = \frac{S(\theta, \phi)}{S(\theta, \phi)_{\max}}, \quad (2.11)$$

missä $S(\theta, \phi)$ on Poytingin vektori.

Vaikka säteilykuvion ominaisuuksien tarkasteluun tarvitaan 3-ulotteisia vektoreita, voidaan useaan sovellukseen saada tarpeeksi tietoa antennista seuraavien yksinkertaisten skalaariarvojen perusteella:

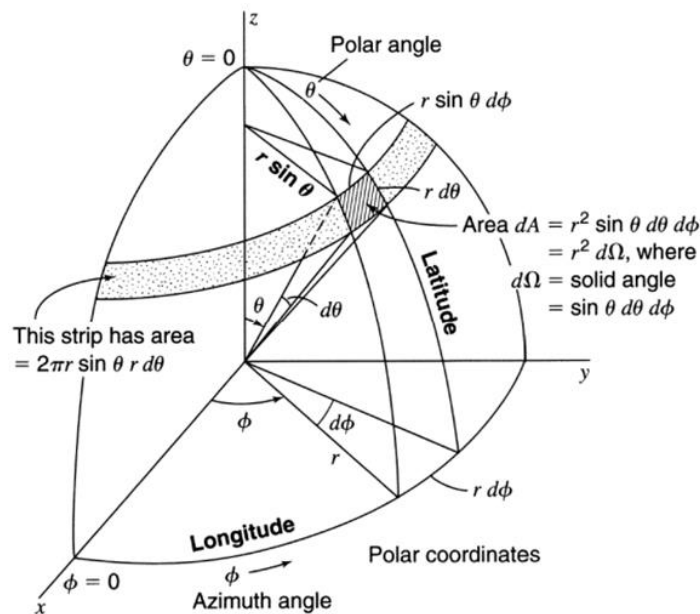
- puolen tehon keilanleveys
- keilan pinta-ala (beam area, Ω_A)
- keilan hyötysuhde (beam efficiency, ε_M)
- suuntaus (directivity, D)
- vahvistus (gain, G)
- tehollinen pinta-ala (effective aperture, A_e). [13, s. 18]

2.3.3 Keilan pinta-ala

Napakoordinaatistossa vähittäin kasvava pinta-ala dA pallon pinnalla on pituuden $r d\theta$ suuntaan θ ja $r \sin\theta d\phi$ suuntaan ϕ tulo, kuten kuvasta 2.7 nähdään. Eli pinta-alan kasvu voidaan kirjoittaa muotoon

$$dA = (r d\theta)(r \sin\theta d\phi) = r^2 d\Omega, \quad (2.12)$$

missä $d\Omega$ on avaruuskulma (*solid angle*) yksikkönä steradian (sr) tai square degree ($^\square$).



Kuva 2.7. Napakoordinaatistossa pinta-alan dA inkrementaalinen kasvu. [13, s. 19]

Kaavalla 2.13 havainnollistetaan kuinka radiaani, steradiaani ja square degree liittyvät toisiinsa ja kuinka onnistuu muunnos näiden yksiköiden välillä

$$1 \text{ steradian} = \text{radian}^2 = \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 = 3282,8 \text{ sr (square degrees)}. \quad (2.13)$$

Antennin keilan ala Ω_A saadaan integroimalla normalisoitu tehokuvio (2.11) koko pallon pinta-alan yli ($4\pi sr$) kaavan 2.14 mukaisesti:

$$\Omega_A = \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} P_n(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi. \quad (2.14)$$

Tämä kaava kirjoitetaan yleensä muotoon

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega, \quad (2.15)$$

missä $d\Omega = \sin(\theta) d\theta d\phi$.

Antennin keilan alue on avaruuskulma, jonka kautta kaikki antennin säteilyenergia kulkee mikäli $P(\theta, \phi)$ säilyttää maksimiarvonsa koko ajan Ω_A :n yli ja on nolla kaikkialla muualla. [13, s. 19]

2.3.4 Keilan hyötysuhde

Keilan kokonaispinta-ala Ω_A koostuu todellisuudessa pääkeilan alueesta Ω_M sekä sivukeilojen alasta Ω_m , joten kokonaispinta-ala on:

$$\Omega_A = \Omega_M + \Omega_m. \quad (2.16)$$

Pääkeilan ja kokonaispinta-alojen suhde kuvaa kuinka tehokkaasti antenni säteilee pääkeilan suuntaan. Keilan hyötylyhde voidaan kirjoittaa muotoon

$$\varepsilon_M = \frac{\Omega_M}{\Omega_A}. \quad (2.17)$$

2.3.5 Antennin suuntaavuus ja vahvistus

Antennin suuntaavuus on antennin säteilyn tehontiheyden maksimin ja keskiarvon välinen suhde. Antennin suuntaavuutta tulee tarkastella antennin kaukokentässä aikaisemmissa luvuissa mainittujen ilmiöiden takia. Antennin suuntaavuutta voidaan tarkastella kaavan 2.18 avulla:

$$D = \frac{P_n(\theta, \phi)_{max}}{P_n(\theta, \phi)_{av}}. \quad (2.18)$$

Antennin suuntaavuus on aina suurempi tai yhtä suuri kuin yksi. Antennin suuntaus voidaan myös määrittää antennin keilan pinta-alan funktiona seuraavasti:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}. \quad (2.19)$$

Kaavasta 2.19 voidaan havaita, että pienentämällä antennin keilan pinta-alaa Ω_A antennin suuntaavuus kasvaa. Kaavan 2.19 avulla voidaan laskea ideaalinen isotrooppisen antennin suuntaavuus, joka on pienin mahdollinen eli yksi, koska antenni säteilee pallomaisesti koko pinta-alaltaan 4π (sr).

Antennin vahvistus on todellinen suuntauksesta saatu etu, joka on aina pienempi kuin suuntauksen arvo D . Todellisuudessa antennissa on häviötä, jotka johtuvat muuan muassa epäsovituksista ja antenniin syötetystä tehosta, joka ei säteile pois päin antennista vaan ainoastaan takaisin lämmittäen antennia. Antennin vahvistuksen ja suuntauksen välillä on kuitenkin yhteys, kuten kaavasta 2.20 voidaan havaita:

$$G = kD, \quad (2.20)$$

missä k on hyötysuhdekerroin, joka on väliltä 0-1. [13 s. 23]

2.3.6 Tehollinen pinta-ala

Antennin tehollista pinta-alaa tarkastellaan tutkimalla vastaanottoantennin toimintaa. Antenni vastaanottaa tasoaallon tehontiheydellä S . Antennin tehollinen pinta-ala ilmoitetaan neliömetreissä A_e . Tehollinen pinta-ala on ala, jolla antenni pystyy vastaanottamaan saapuvia aaltomuotoja. [8, s. 71] Vastaanotettu teho voidaan kirjoittaa muotoon:

$$P_r = SA_e. \quad (2.21)$$

Monien antennien tapauksessa, kuten torvi – ja lautasantenneilla, on helppo käsittää mikä on antennin pinta-ala ja tehollinen pinta-ala. Antennin tehollinen pinta-ala on kuitenkin lähes aina erisuuruinen kuin antennin fysikaalisiin mittoihin perustuva kokonaispinta-ala. Antennin pinta-alan hyötysuhde voidaan esittää muodossa:

$$\epsilon_{ap} = \frac{A_e}{A_p}, \quad (2.22)$$

missä A_p on antennin fyysinen pinta-ala.

Antennin vahvistus voidaan yhdistää antennin teholliseen pinta-alaan kaavan 2.23 mukaisesti:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e. \quad (2.23)$$

2.3.7 Kaistanleveys

Antennin kaistanleveys ilmoittaa millä taajuusalueilla antenni toimii. Kaistanleveys usein määritellään kahdella eri tavalla:

- alue, jolla tehon vahvistus pysyy 3 dB:n sisällä maksimiarvostaan

- alue, missä VSWR on pienempi tai yhtäsuuri kuin 2.

Antennin säteilykuvio ja ominaisuudet saattavat muuttua merkittävästi antennille määritellyn kaistanleveyden ulkopuolella. [8, s. 70]

2.3.8 Vapaan tilan eteneminen

Friis'in yhtälöä (*Friis transmission equation*) käytetään tietoliikennetekniikassa kuvaamaan kahden ideaalisesti toisiinsa nähden toimivan antennin välistä lähetystä – ja vastaanottoa ja näin selvittämään vastaanotetun tehon suuruutta vapaassa tilassa. Antennien oletetaan sijaitsevan toistensa kaukokentissä etäisyydellä r . Jos lähetysantennin lähetysteho on P_t , niin tehotiheys S vastaanottoantennissa on:

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2}. \quad (2.24)$$

missä G_t on lähetysantennin vahvistus. Sijoittamalla yhtälö 2.24 yhtälöön 2.21, vastaanotetuksi tehoksi saadaan:

$$P_r = S A_e = \frac{P_t G_t A_e}{4\pi r^2}, \quad (2.25)$$

missä A_e on antennin tehollinen pinta-ala. Antennin vahvistus voidaan ilmoittaa myös muodossa:

$$G_t = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}. \quad (2.26)$$

Jos kaavaan 2.25 sijoitetaan yhtälön 2.23 mukainen tehollinen pinta-ala A_e , niin saadaan Friis'in yhtälö:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2. \quad (2.27)$$

Friis'in yhtälössä lähdetään liikkeelle siitä, että lähetys tapahtuu ideaalisessa ympäristössä ja antennit ovat impedansseiltaan täydellisesti sovitettuja (*matched*), kuten aiemmin on todettu. Tällaista tilanne ei kuitenkaan lähes koskaan saavuteta todellisuudessa muun muassa esteiden, rakennuksien, heijastuksien ja antennien ominaisuuksien takia. [13, s. 36]

2.3.9 Vastaanottimen kohinataso

Taustakohinaa on kaikissa radiovastaanottimissa, vaikka vastaanottimet suunniteltaisiin huolella. Radiojärjestelmää suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että vastaanottimen suorituskyky vastaa vaadittua tasoa. Vastaanottimen tärkein elementti, jonka avulla voidaan vaikuttaa kohinatason suuruuteen, on RF-vahvistin. Tämän vuoksi vastaanottimen etupäähän (*radio front end*) yleensä sijoitetaan LNA, jonka kohinaluku on matala.

Kohinaa saa alkunsa monista eri lähteistä, mutta mikäli tarkastellaan ainoastaan vastaanottimen termistä kohinaa, kohinataso voidaan esittää kaavan 2.28 mukaisesti:

$$Kohinataso = kTFB = kT \left[\frac{mW}{Hz} \right] + NF [dB] + B [dBHz], \quad (2.28)$$

missä k on Boltzman:in vakio, T on lämpötila, F on kohinakerroin, B on kaistanleveys ja NF on kohinaluku. [6, s. 267]

3. MITTAUKSET

Uusien kerrostalojen PIM-särön ja peittoalueen tutkiminen aloitettiin käyttäen tämän luvun esittämiä mittausmenetelmiä. Tässä luvussa esitellään kaikki mittausmenetelmät ja mittalaitteet, joita tutkimuksessa on käytetty. Luvussa esitellään lisäksi omissa alaluvuissaan mittaustulokset kaikista kolmesta mittauskokonaisuudesta. Peittomittausten yhteydessä toteutettiin myös rakennusmateriaalien läpäisymittauksia. Kaikki mittaukset suoritettiin kesän ja syksyn 2015 aikana Tampereen alueella sijainneissa rakenteilla olevissa kerrostaloasunnoissa. Alla on listattu tehdyt mittaukset:

- Peittomittaukset ja rakennusmateriaalien läpäisymittaukset
- Passiivisen keskinäismodulaation mittaukset
- Antennin tehomittaukset.

3.1 Mittausmenetelmät ja laitteet

Peittomittausten tavoitteena oli tarkoitus arvioida sisäverkon antennien erilaisten sijoituspaikkojen vaikutusta asuinkerrostalojen eri huoneistojen signaalitasoihin. Tarkoituksena oli selvittää kerrostason kattaminen yhdellä tai kahdella antennilla ainakin kahden edustavan uuden asuinkerrostalon tapauksessa. Peittomittauksissa mitattiin mobiilisignaalin kuuluvuutta koko asuinkerroksen osalta GSM – ja UMTS–taajuuksilla. Näiden tulosten avulla pyrittiin kalibroimaan Winprop–simulaatio ohjelma käyttäen lähtöarvoina mitattuja materiaalien vaimennusarvoja. Mikäli simulaattori saadaan toimimaan oikeaa tilannetta vastaavasti, voidaan sitä käyttää tehokkaammin avuksi sisäverkon suunnitteluprosessissa.

Peittomittaus toteutettiin asettamalla asuinkerroksen käytävätilaan lähetysantenni, johon syötettiin signaali Anritsu:n MT8820A signaaligeneraattorista. Signaaligeneraattorin avulla voidaan simuloida GSM – sekä UMTS–verkon toimintaa. Tämän jälkeen asunnossa liikuttiin koko asuinkerroksen alueella matkapuhelimen kanssa, joka oli lukittu vastaanottamaan signaaligeneraattorin lähettämää signaalia. Matkapuhelimeen oli asennettu Nemo Outdoor–ohjelmisto. Ohjelmiston avulla saadaan mitattua ja tallennettua vastaanotetun radiosignaalin teho asuinkerroksen jokaisessa kohdassa, jossa on liikuttu matkapuhelimen kanssa.

Kuvassa 3.1 on esitetty peittomittauksissa käytetty antenni. Mittaukset suoritettiin kuvan vasemmanpuoleisella antennilla. Kuvan oikeanpuoleinen osa kuvaa alkuperäistä antenna, jonka tyypikilven valokuva on kuvan alaosassa. Erona näillä antennilla on vain ulkokuori, sillä alkuperäinen antenni on tarkoitettu vain yhteen asennuskertaan, eikä se mekaanisen kestävyytensä vuoksi soveltunut useammassa kohteessa tehtäviin kenttämittauksiin.



Kuva 3.1. Peittomittauksissa käytetty antenni.

Anritsu:n signaaligeneraattori MT8820A on tarkoitettu lähinnä radiopuhelinten suorituskyvyn ja toiminnan mittauksiin ja tämän takia sen ulostuloteho rajoittuu -10 dBm:n suuruusluokkaan. Tämä teho on sisäpeiton mittauksiin riittämätön, jonka takia signaaligeneraattorin ulostuloon kytkettiin erillinen, kahdella taajuusalueella toimiva vahvistin. Vahvistimen tyyppi ja tiedot on esitetty kuvassa 3.2. Vahvistimen avulla saatiin lähetystehoksi noin 20 dBm.



Technical Specification

Specification	KT-903G-B
Frequency range	Uplink: GSM 890-915MHz / 3G 1920-1980MHz Downlink: GSM 935-960MHz / 3G 2110-2170MHz
Gain	Gp<65
(dB)	Gp<70
Gain adjustable	MGC<30dB
Output power	±20dBm
Pass band ripple	±2dB
Guard band rejection	(BW-60dB)<42MHz, (BW-70dB)<45MHz
I/O impedance	50Ω/N Connector
I/O return loss	≥8dB
Noise figure	≤8dB
Intermodulation attenuation	≤40dBc
(Po=33dBm)	
Transmission	≤0.5μs
Ambient	-10°C~50°C

Kuva 3.2. Peittomittauksissa käytetty vahvistin.

Asuinnoissa toteutettiin lisäksi rakennusmateriaalien läpäisymittauksia, jotka tehtiin aikaisemmin suoritettun PassiiviTele2-projektin esittämällä laitteistolla ja menetelmällä [14, s. 10]. Läpäisyarvot mitattiin jokaisesta erilaisesta pinnoitteesta, jota oli asuinkeuhkossa. Näitä rakennusmateriaalien mitattuja vaimennusarvoja käytettiin Winprop-simulaatiohjelmassa, jotta saimme simulaation paremmin vastaamaan käytännön tilannetta. Simulaattoriin piirrettiin tarkka pohjakuva mittauskohteena olleesta rakennuksesta. Tämän jälkeen asetettiin seinien, ovien sekä muiden rakenteiden vaimennusarvoiksi mitatut arvot, joiden huomattiin poikkeavan merkittävästi ohjelman valmiiksi määrittelemistä vaimennuksista.

WinProp-simulaatioissa on käytetty Dominant Path mallia (DPM). Tässä mallissa ohjelma päättää signaalin etenemisreitit käyttäen vain yhtä etenemistietä, hallitsevaa ete-

nemistietä (*dominant path*). Tämä yksi etenemistie kattaa yli 90 % signaalin tehosta. Tämän takia kattavuuden laskeminen käyttäen DPM:a on nopeaa ja tulosten perusteella riittävän tarkkaa.

DPM:ssä oli noin kymmenen säädettävää parametria, joista löydettiin eräs yhdistelmä, jonka avulla saatiin lupaavia tuloksia molemmilla käytetyillä taajuuksilla kaikissa mitauskohteissa. Ainoa rakennuksesta riippuvainen parametri oli rakennuksen käytävän leveys, joka voi vaihdella ratkaisevasti rakennusten välillä. Tämä parametri vaikuttaa huomattavasti mittaustuloksiin sillä sisäverkoissa antenni on usein sijoitettu juuri käytävään tai sen välittömään läheisyyteen. Ohjelman avulla tätä parametria on kuitenkin helppo muuttaa ennen simuloinnin aloittamista. Simulaattorin antennina käytettiin ympärisäteilevää antennia, sillä todellisuudessa antennin säteilykuvion selvittäminen sisätilassa on haastavaa, koska se muuttuu ympäristön vaikutuksesta merkittävästi.

Passiivisen keskinäismodulaation tutkimuksessa oli tarkoitus mitata todellisen verkon PIM-arvoja käyttämällä sisäverkkojen verkonrakennuksessa tällä hetkellä tavallisimmin asennettavia komponentteja sekä löytää suosituksia antennien valintaan ja asennustapaan PIM-särön välttämisen näkökulmasta.

Passiivista keskeismodulaatiota mitattiin kahdella eri PIM-mittarilla, PIM21-mittarilla ja PIM Masterilla. Molemmat mittarit toimivat samalla periaatteella eli mittasivat IM3:n suuruutta GSM900-taajuusalueella. PIM:n on havaittu olevan taajuusriippumaton, joten voidaan olettaa, että PIM käyttäytyy muillakin taajuuksilla tämän tutkimuksen tulosten mukaisesti [15]. Mittarin toiminta periaate on yksinkertainen. Se lähettää kaksi signaalia, mittauksissa käytettiin taajuuksia 935 MHz ja 960 MHz. Tällöin lähimmäksi käytettyjä taajuuksia syntyvät kolmannen asteen keskinäismodulaatio tuotteet taajuuksille 910 MHz ja 985 MHz. Käytetyt mittarit kuitenkin mittaavat vain toisen, tässä tapauksessa taajuudella 910 MHz olevan signaalin voimakkuutta. Mittarien lähetysteho oli 2x33 dBm. Säteilyturvakeskuksen asettamien rajoitteiden mukaisesti antennin lähetysteho saa olla maksimissaan 33 dBm (2 W), mikäli antenni sijaitsee tilassa, jossa ei oleskella pitkään ja antenni on asennettu yli kahden metrin korkeuteen [2, s. 7]. Mittaukset suoritettiin siis sallitulla maksimiteholla. Koska PIM:n teho kasvaa syöttötehon funktiona, näin saatiin selville PIM:n suuruus huonoimmassa tilanteessa.

PIM-Mittauksissa käytettiin kahta antennia, Galtronics:in Pear S5491i:a [LIITE A] ja Huber+Suhner:n Sencity Ultra:a [LIITE B]. Molemmat antennit ovat suunniteltu toimimaan sisäverkon antenneine ja olivat PIM-ominaisuuksiltaan mittauksiin sopivat. Antennit on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. PIM-mittauksissa käytetyt antennit.

Keskeismodulaatio mittausten tarkoituksena oli selvittää miten antennin sijoittaminen ja antennin ympäristö vaikuttavat PIM-arvoon. Tämän takia antenni oli kiinnitetty teleskooppitelineeseen, jonka avulla antennia sai liikutettua helposti korkeus – ja vaakasuunnassa. Kuva antennin kiinnittämisestä teleskooppitelineeseen on esitetty kuvassa 3.4. Teleskooppivarren jatkeena käytettiin lisäksi puista kiinnikettä, jotta antennin lähikentässä ja läheisyydessä olisi mahdollisimman vähän metallia sisältävää materiaalia.

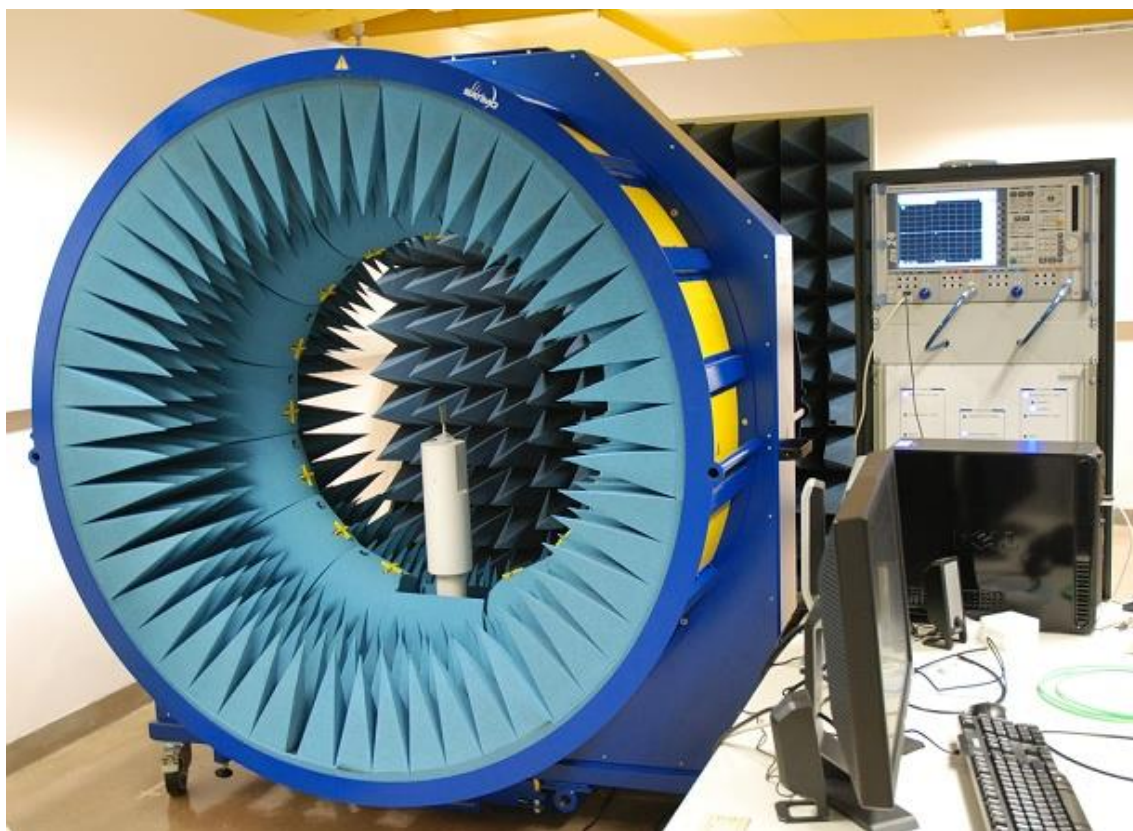


Kuva 3.4. Mittauksissa käytetty antennin teline.

Antennit olivat kytketty kaapelilla käytettyyn PIM-mittariin. Kaapelin kiinnittämisessä anteeniin ja mittariin käytettiin valmistajien ilmoittamia momenttiarvoja, jotta siitä ei syntyisi PIM:ta, joka vääristäisi mittaustuloksia [LIITE A] [LIITE B].

Antennin tehon mittausten tutkimuksen osassa oli tarkoitus arvioida nykypäivänä suunniteltavien matkapuhelin-sisäverkkojen yksittäisten antennien todellista säteilytehoa. Tavallisesti yksittäiset antennit palvelevat useamman operaattorin matkapuhelinverkkoja, ja ne tukevat eri teknologioiden käyttämiä taajuuskaistoja. Otettaessa huomioon eri teknologioiden kokonaissyöttötehot sekä tavallisten antennien impedanssisovitukset ja vahvistukset, on haastavaa arvioida säteilyturvakeskuksen määräysten mukaisen säteilyn enimmäistehon suhdetta verkon eri operaattoreiden ja eri teknologioiden vahvistimien syöttötehoon.

Antennin säteilemän todellisen tehon suuruuden selvittämisessä käytettiin Tampereen teknillisen yliopiston Satimo Starlab-simulaattoria. Simulaattorin avulla voidaan selvittää antenniin syötetyn – ja vastaanotetun tehon suhdetta, josta saadaan antennin hyötysuhde. Antennin vastaanottamassa tehossa on kuitenkin tässäkin tapauksessa pieniä häviöitä, joita antennilla on aina tilanteesta riippumatta. Kuvassa 3.5 on esitelty käytetty mittausjärjestely – ja laitteisto.



Kuva 3.5. Starlab-simulaattorin mittausjärjestely.

Kuvassa 3.5 nähdään oikealla Anritsun verkkoanalysaattori (VNA) 37369C. Verkkoanalysaattori syötti järjestelmään tehoa toisesta portista ja vastaanotti tehoa toisella portilla. Simulaattorin kehikko oli alumiinia ja se oli päällystetty absorboivalla materiaalilla heijastusten (*reflections*) ja sironnan (*scattering*) rajoittamiseksi. Mittaustilanteessa kehikon molemmille puolille asetettiin lisäksi absorboivasta materiaalista rakennetut suojat. An-

tenni sijoitettiin mahdollisemman keskelle simulaattorin sisään. Kehikon sisällä on nähtävissä keltaisia sensoreita, joiden avulla voidaan lähettää tai vastaanottaa signaaleja. Tässä tapauksessa halusimme tutkia antennin säteilyn määrää, joten kehikossa olleet sensorit asetettiin vastaanottamaan signaalia lähettävältä antennilta. Koko järjestelmää ohjattiin kaupallisella PC:llä. PC:n avulla voidaan asettaa kaikki mittauksiin liittyvät parametrit sekä sen avulla saadaan prosessoitua mittaustulokset. Koska simulaattorin ala on suhteessa antennin hyvin pieni, niin mittaukset suoritettiin antennin lähikentässä. Ennen datan prosessointia mittaustuloksille suoritettiin PC:llä lähikaukokenttä-muunnos, jonka jälkeen mittaustulokset ovat käyttökelpoisia kaukokentässä tarkasteltavaksi.

Mittaukset suoritettiin kahdella ominaisuuksiltaan erilaisella Kathrein:in antennilla. Mitatut taajuusalueet olivat paneeliantennilla [LIITE C] 800-960 MHz ja 1800-2700 MHz, jotka kattavat tutkimuksen kohteena olevien (GSM, UMTS) järjestelmien käyttämät taajuuskaistat. Lautasantennilla [LIITE D] mittaukset suoritettiin ainoastaan taajuusalueella 800-960 MHz, sillä ylemmälle kaistalle 1800-2700 MHz ei ollut sopivaa kalibrointiantennia.

3.2 Peittomittausten tulokset

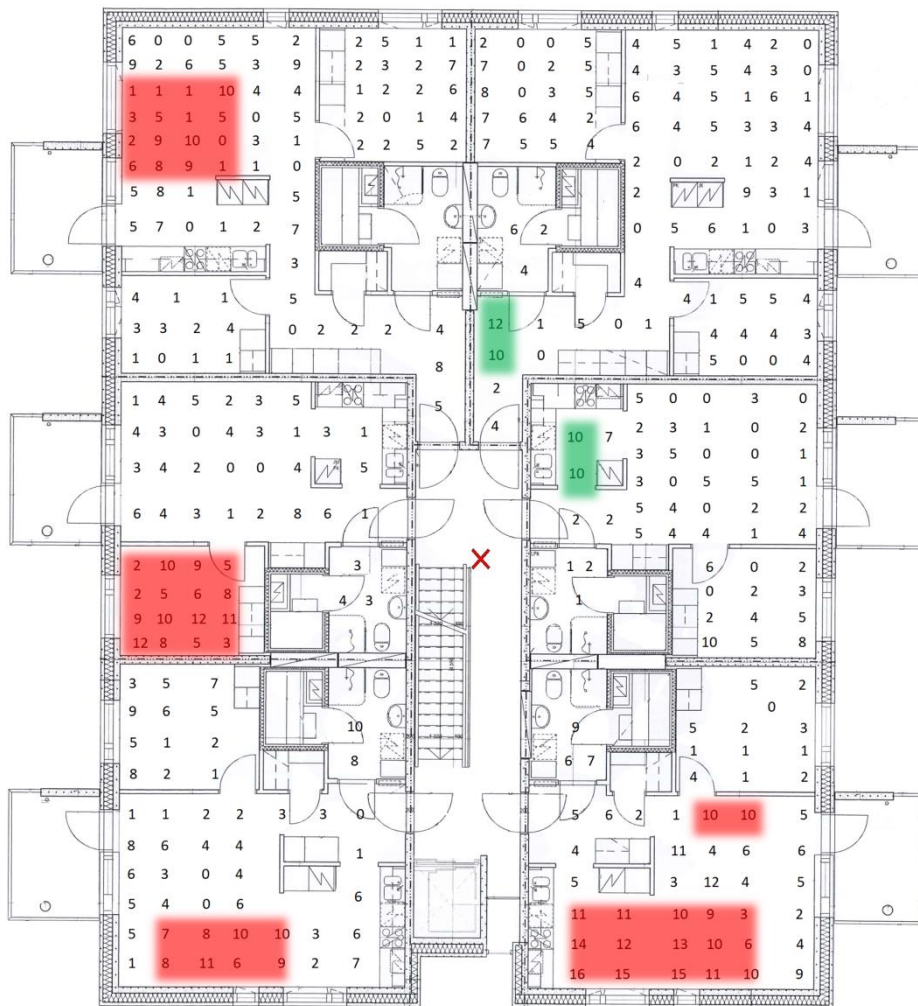
Tässä luvussa esitellään peittomittausten tulokset. Peittomittauksia suoritettiin kolmessa eri kerrostalossa Tampereen alueella. Kaikki rakennukset olivat luovutusta vaille valmiita, joten kaikki pinnoitteet ja rakenteet olivat valmiita. Asuntoihin oli lisäksi sijoitettu jo kodinkoneet. Kaikissa mittauksissa mittaukset tehtiin sekä GSM (900 MHz) että UMTS (2100 MHz) taajuuksilla. Mittaus kattoi kummassakin tapauksessa yhden asuin-kerroksen pinta-alan. Tulokset on esitetty muodossa, jossa rakennuksen pohjakuvaan on kirjoitettu lukuarvoja, jotka ovat mittausten ja simulaation vaimennusarvojen erotuksen itseisarvo. Tuloksista on lisäksi korostettu haastavia alueita punaisella ja vihreällä värillä. Punainen väri tarkoittaa, että simulaattori on arvioinut signaalin voimakkuuden optimistisesti eli paremmaksi kuin mitattu arvo. Vihreä väri puolestaan tarkoittaa, että simulaattori on arvioinut signaalin voimakkuuden pessimistisesti eli huonommaksi kuin mitattu arvo. Vihreät alueet ovat siis peittosuunnittelun näkökulmasta harmittomampia. Pohjakuviin on merkattu antennin sijainti käyttämällä punaista rastia.

3.2.1 Mittauskohde 1

Kuvassa 3.6 on esitetty mittaustulokset mittauskohteen 1 tapauksessa taajuudella 900 MHz. Kuvasta nähdään, että haastavia alueita löytyy sekä asuinrakennuksen reunoilta että käytävän päästä.

Kuvasta 3.6 voidaan havaita, että simulaattorin optimistisesti arvioimat alueet ovat sellaisten elementtien takana, joissa tapahtuu suurta signaalin vaimentumista. Suurta vaimentumista aiheuttavat tässä tilanteessa sauna, hissi ja jääkaappipakastin-yhdistelmä.

Jääkaappipakastin-yhdistelmän tapauksessa on hyvin vaikea saada selville tarkkaa vaimennusta, sillä sen rakenne on hyvin haastava eikä vaimennus ole todellisuudessa sama jokaiseen suuntaan. Tämä voi osaltaan selittää, minkä vuoksi erot mittausten ja simulaattorin välillä ovat suuret näillä alueilla. Lisäksi kaikki simulaattorin optimistisesti arvioimat alueet ovat aivan mittausalueen reunoilla, missä etäisyys antenniin on korkeimmillaan. Tällöin lähetysantennin ja vastaanottimen välillä on suuri määrä erilaisia vaimennuselementtejä, jotka tuovat epätarkkuutta simulaattorin laskemiin vaimennusarvoihin. Epätarkkuutta tuovat muun muassa heijastukset, joita ehtii tapahtua enemmän pidemmän etenemismatkan aikana.

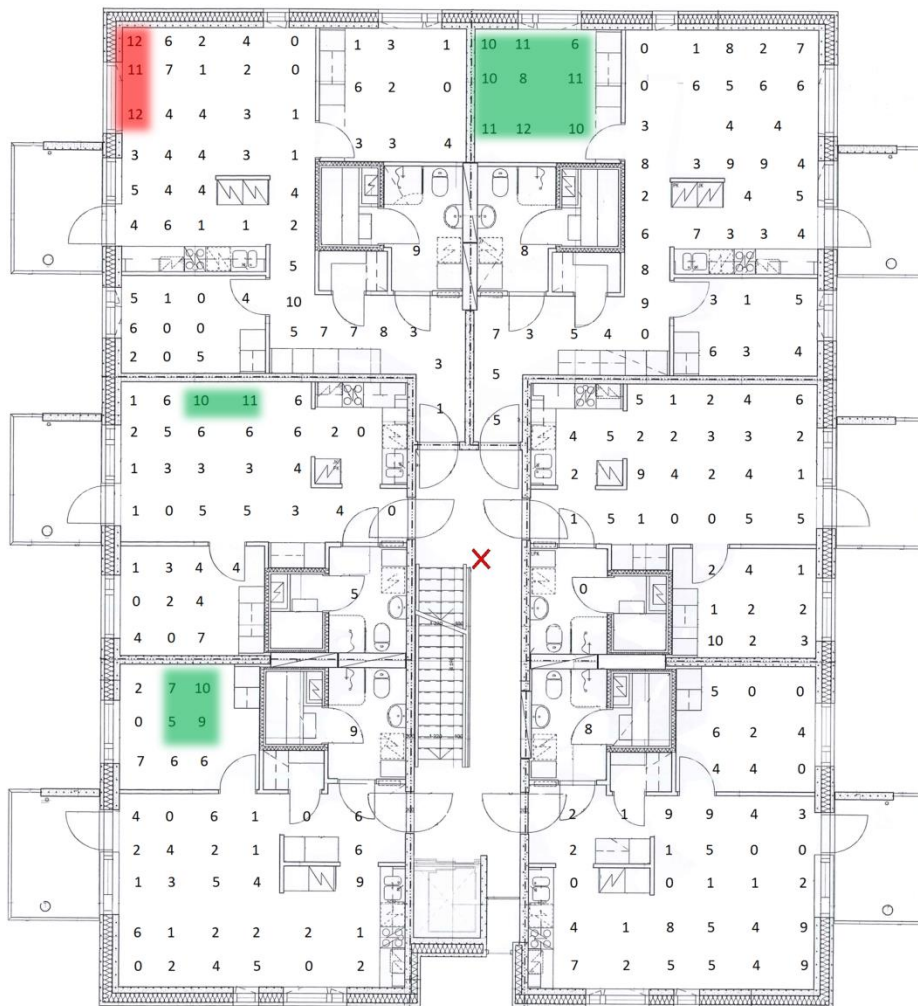


Kuva 3.6. Mittauskohteen 1 tulokset 900 MHz taajuudella.

Kuvan 3.6 perusteella havaitaan, että pessimististä arviointia on tapahtunut ainoastaan päätyasunnon kohdalla. Tämä ero voidaan selittää tunneliefektin avulla. Tunneli-efekti aiheuttaa tilanteen, jossa käytävän seinät toimivat osittain heijastinpintoina, ja ne ohjaavat signaalia käytävän suuntaiseksi [14, s. 24]. Käytännössä tämä näkyy niin, että talon päädyissä olevissa huoneistoissa on verrattain voimakas signaalitaso käytävään sijoitetusta

antennista syötettynä. Simulaattori laskee peittokartan ainoastaan yhtä signaalitietä käyttäen, tämän takia se ei ota huomioon heijastuksia, joita tässä tapauksessa syntyy huomattavasti tunneli-efektin johdosta.

Kuvassa 3.7 on esitetty mittaustulokset mittaushaaran 1 tapauksessa taajuudella 2100 MHz. Kuvasta 3.7 havaitaan, että eroa todellisten mittausten ja simulaattorin välillä on huomattavasti vähemmän 2100 MHz taajuudella verrattuna 900 MHz taajuuteen. Tässä tapauksessa on ainoastaan yksi simulaattorin arvioima optimistinen paikka, joka on aivan asuinrakennuksen kulmassa jääkaappipakastin-yhdistelmän takana. Simulaattorin pessimistisesti arvioimat alueet ovat jakautuneet hieman, mutta kaksi suurinta aluetta ovat saunojen takana. Ero voidaan siis selittää paljon vaimentavan elementin avulla.

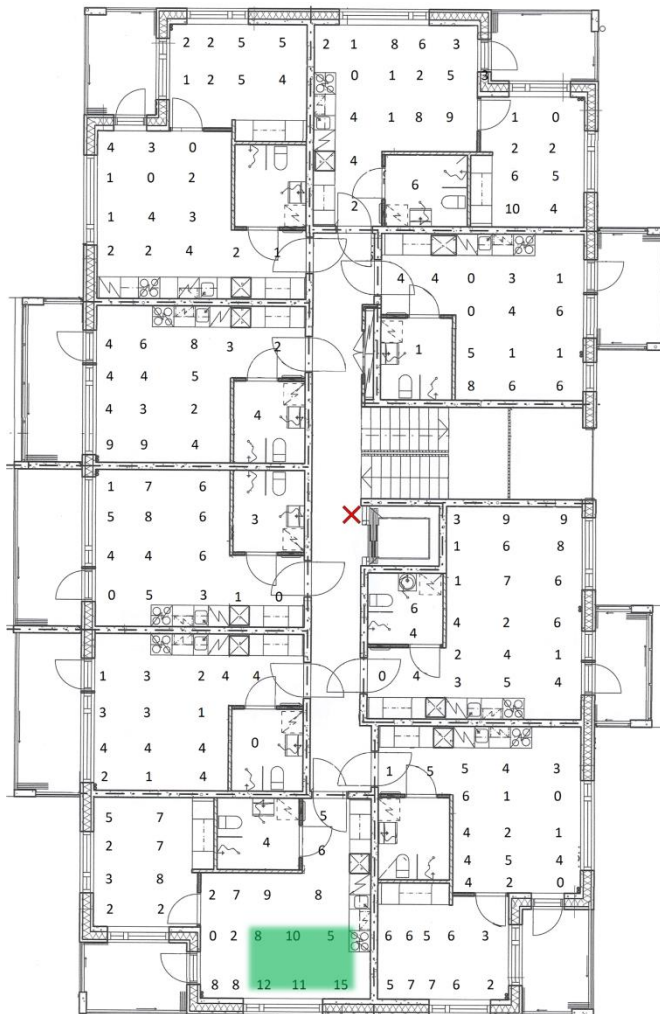


Kuva 3.7. Mittauskohteen 1 tulokset 2100 MHz taajuudella.

3.2.2 Mittauskohde 2

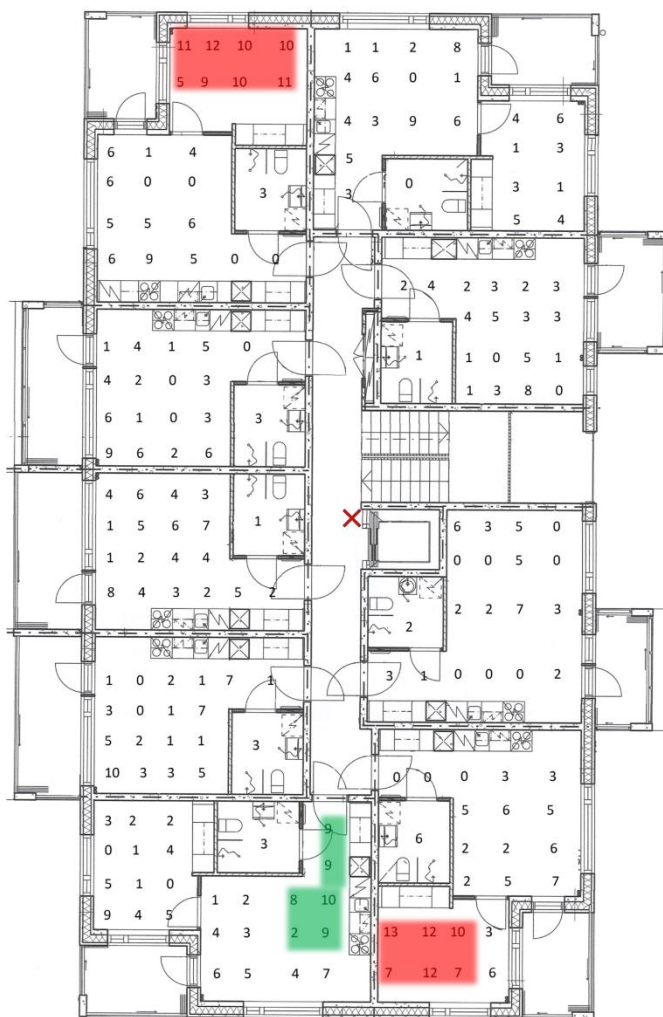
Kuvassa 3.8 on esitetty mittaustulokset mittaushaaran 2 tapauksessa 900 MHz taajuudella. Kuvasta voidaan havaita, että tässä rakennuksessa ei ollut saunaa eikä muitakaan paljon vaimentavia rakenteita hissiä lukuun ottamatta. Mittaustulokset ja simulaattorin

arvot ovat siis hyvin lähellä toisiaan. Antenni on sijoitettu aivan käytävän keskelle, jonka takia päätyasunnossa on jälleen havaittavissa tunneli-efektin aiheuttama ero mittauksen ja simulaattorin arvojen välillä.



Kuva 3.8. Mittauskohteen 2 tulokset 900 MHz taajuudella.

Kuvassa 3.9 on esitetty mittaustulokset mittaushuoneen 2 tapauksessa 2100 MHz taajuudella. Kuvasta 3.9 nähdään, että tunneli-efektin aiheuttama ero on samassa asuinhuoneistossa kuin kuvassa 3.8. Tämän lisäksi on havaittavissa kaksi punaista aluetta aivan mitausalueen reunalla, joiden ero voidaan selittää suurella etäisyydellä lähetysantennin ja vastaanottimen välillä. Erot ovat nähtävissä ainoastaan 2100 MHz taajuudella, sillä pääsääntöisesti signaali vaimenee enemmän korkeammilla taajuuksilla kuin matalilla taajuuksilla.



Kuva 3.9. Mittauskohteen 2 tulokset 2100 MHz taajuudella.

3.2.3 Mittauskohde 3

Kuvassa 3.10 on esitetty mittaustulokset mittauskohteen 3 tapauksessa 900 MHz taajuudella. Tässä mittauskohteessa oli käytössä aikaisemmista mittauskohteista eroavat sauna – ja WC-tilat. Kuten kuvasta 3.10 nähdään, WC-tila on täysin erillinen elementti, jonka vaimennukset ovat moninkertaiset verrattuna perinteiseen pesutilojen seinissä käytettyyn materiaaliin. Kuvasta voidaan havaita, että tämä on aiheuttanut muutamassa huoneessa hieman vaikeuksia, jonka takia erot simulaattorin ja mitattujen vaimennusten välillä ovat näillä alueilla suuria.

Simulaattorin arvioimia optimistisia paikkoja on tässä tapauksessa vain yksi. Se on aivan rakennuksen reunalla ja WC-elementin takana. Pessimistisesti arvioituja sijainteja on kolmessa eri huoneessa. Kuvasta 3.10 nähdään, että kolme näistä alueesta on WC-elementtien takana, mutta ei kuitenkaan kovin kaukana lähetysantennista. Näistä tuloksista voidaan siis tehdä johtopäätös, että paljon vaimentavat WC-elementit heikentävät simulaattorin kykyä arvioida peittoa. Niiden materiaalit ovat sellaisia, jotka aiheuttavat normaali

seinää enemmän heijastuksia ja sirontaa, jotka näkyvät erona simulaattorin ja todellisten mittausten välillä. Toisessa päätyasunnossa on jälleen simulaattorin arvioima pessimistisesti paikka, joka on tulosta tunneli-efektistä.



Kuva 3.10. Mittauskohteen 3 tulokset 900 MHz taajuudella.

Kuvassa 3.11 on esitetty mittaustulokset mittaushuoneen 3 tapauksessa 2100 MHz taajuudella. Kuvasta nähdään malliesimerkki tunneli-efektistä. Molemmissa päätyasunnoissa simulaattori on arvioinut tilannetta pessimistisesti. Kuvasta nähdään myös, että optimistisesti arvioidut alueet löytyvät WC-elementtien takaa. Vasemmassa alanurkassa oleva tilanne on täysin vastaava kuin 900 MHz:n tilanteessa. Asuinkerroksen keskikohdalla on mielenkiintoinen tilanne, sillä 900 MHz:n taajuudella simulaattori oli arvioinut paikan pessimistisesti ja 2100 MHz:n tilanteessa optimistisesti. Tuloksiin on myös vaikuttanut se, että etenemisvaimennukset kasvavat taajuuden funktiona. Alue sijaitsee lisäksi paljon vaimentavan WC-elementin takana, jonka on huomattu aiheuttavan eroa simulaattorin ja mittausten vaimennusarvojen välille.



Kuva 3.11. Mittauskohteen 3 tulokset 2100 MHz taajuudella

3.3 Passiivisen keskinäismodulaation mittausten tulokset

Tässä luvussa esitellään passiivisen keskinäismodulaatio mittausten tulokset. PIM-mittauksia suoritettiin neljässä eri asuinrakennuksessa Tampereen alueella. Talojen valinnan periaatteena oli, että niissä on käytetty nykyaikaisia rakennusmateriaaleja. Kaikissa rakennuksissa oli lisäksi käytössä ELPO-hormit. ELPO-Hormien käyttö on PIM-ongelman näkökulmasta mielekästä, sillä niiden johdosta asuinkerroksen käytävän yläpuolella olevan välikaton alla ei ole sähköhyllyjä, sillä tietoliikenne- ja sähkökaapelit kulkevat pystyhormeja pitkin asuntoihin. Sähkökaapelit ovat ainoastaan ensimmäisen kerroksen ongelma, sillä siellä ne kulkevat käytävän välikaton alla.

Toisessa ja sitä ylemmissä kerroksissa välikaton alla ei siis kulje sähköhyllyjä, mutta sinne on sijoitettu vesiputkia. Vesiputket ovat kupariputkia, jotka on eristetty eristevillalla sekä foliopinnoitteella. Vesiputkia kulkee välikaton alla koko käytävän pituuden ajan.

Mittaustulosten perusteella on havaittu, että sekä lähetysantennin välittömässä läheisyydessä olevalla metallilla että käytävän leveydellä on vaikutusta PIM-arvoon. Käytävän leveyden luokittelussa käytettiin seuraavaa lähestymistapaa:

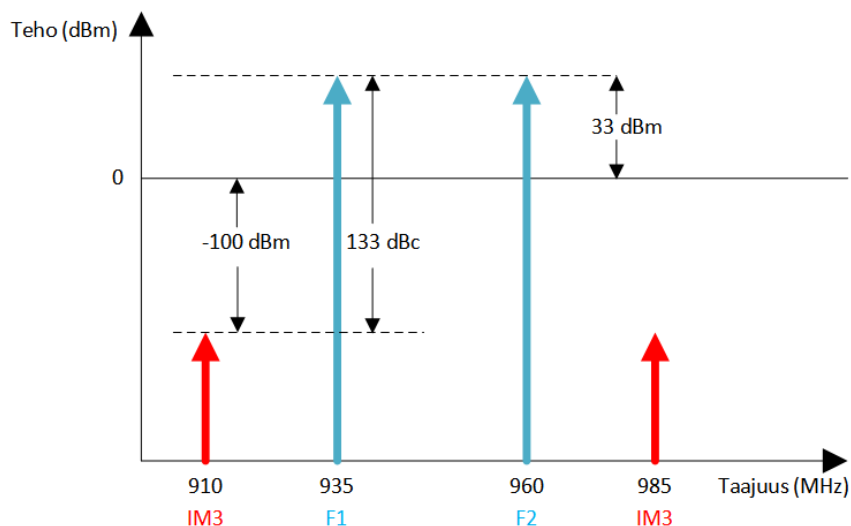
- Kapea käytävä (alle 160 cm leveä)
- Leveä käytävä (yli 160 cm leveä).

Seuraavissa alaluvuissa esitetyt tulokset on esitetty muodossa, jossa useimmissa tilanteissa on asetettu vierekkäin kameralla otettu kuva mittaustilanteesta sekä piirretty havainnekuva samaisesta tilanteesta. Osassa tilanteista on esitetty vain havainnekuva mittaustilanteesta. Havainnekuviin on merkitty paikka, johon antenni on mittaustilanteessa sijoitettu. Antennin sijoituspaikkaan on värien avulla merkitty kuinka hyvä PIM-arvo missäkin kohdassa on ollut:

- Vihreä väri (PIM < -100 dBm)
- Keltainen väri (PIM välillä -100 – -80 dBm)
- Punainen väri (PIM > -80 dBm).

Mittaustapauksiin, joissa PIM-arvo on ollut tarpeeksi alhainen, on myös hahmoteltu antennin optimisijoituspaikka käyttäen sinistä väriä. Kuvien viereen on sijoitettu taulukko mittaustuloksista. Taulukkoon on merkitty y-akselille antennin etäisyys katosta ja x-akselille antennin etäisyys seinästä. Antennin etäisyys seinästä on tulkittu siten, että se on mitattu antennin reunan etäisyytenä käytävän seinästä. Taulukon lukuarvot ovat mitattuja PIM-arvoja, jotka on esitetty yksikössä dBm. Aina ennen mittaustuloksia on esitetty kuva mittaushaasteen pohjakuvasta, josta käy ilmi antennien sijoituspaikat asuinkerroksessa. Pohjakuvaan on merkitty antennien sijoituspaikat punaisella rastilla, ja rastin yhteyteen on kirjoitettu, mikä mittaushaaste on kyseessä.

Tulosten perusteella löydettiin antennin sijoitusalue, jossa PIM-arvo oli suurimmassa osassa mittaustapauksista riittävän alhainen leveällä käytävällä. Kapealla käytävällä tilanne oli huomattavasti haasteellisempi. PIM-arvon katsotaan olevan riittävän matala kun sen teho on -100 dBm lähetystehon ollessa 2x33 dBm. PIM:n suuruus ilmoitetaan yleensä joko yksikössä dBm tai dBc. Näiden yksiköiden välistä yhteyttä on selvitetty kuvan 3.12 avulla. Kuvan mukaisessa tilanteessa on käytetty samoja taajuuksia ja lähetystehoja kuin tutkimuksen mittaustilanteissa.

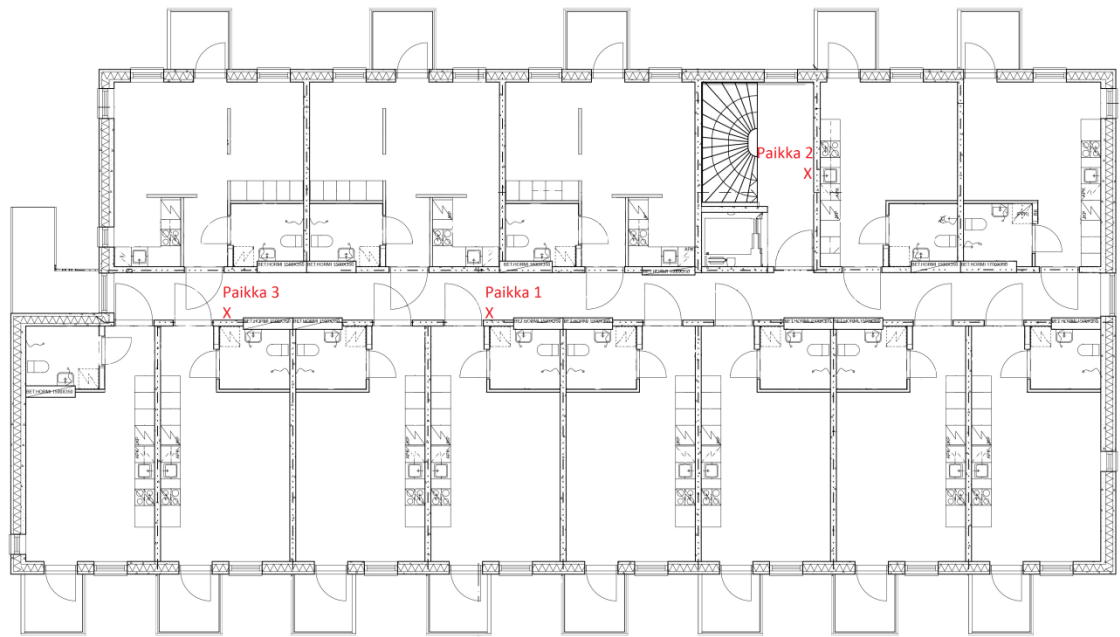


Kuva 3.12. Yksiköiden dBm ja dBc välinen yhteys.

Antennien sekä muiden komponenttien teknisissä tiedoissa PIM-arvo ilmoitetaan usein käyttäen 2×43 dBm tehoa. Mikäli tuloksien mukaista -100 dBm raja-arvoa PIM:lle halutaan tarkastella käyttäen 2×43 dBm tehoa, sen suuruus on -75 dBm. Tässä on arvioitu, että PIM kasvaa/laskee $2,46$ dB/dB [16, s. 5].

3.3.1 Mittauskohde 4

Kuvassa 3.13 on esitelty mittauskohteen 4 pohjakuva. Mittauskohteen käytävä oli alle 160 cm leveä käytävä. Antennien sijainnit on valittu siten, että ne ovat mahdollisemman erilaisia. Antennien sijoituspaikat 1 ja 3 ovat kapealla käytävällä. Mittauspaikat eroavat toisistaan siten, että ne niiden yläpuolella sijainneiden kupariputkien määrässä oli eroja. Antennin sijoituspaikka 2 eroaa kahdesta muusta sijoituspaikasta, sillä se on asuinkerroksen aulan kohdalla. Siinä käytävän leveys oli yli 160 cm.



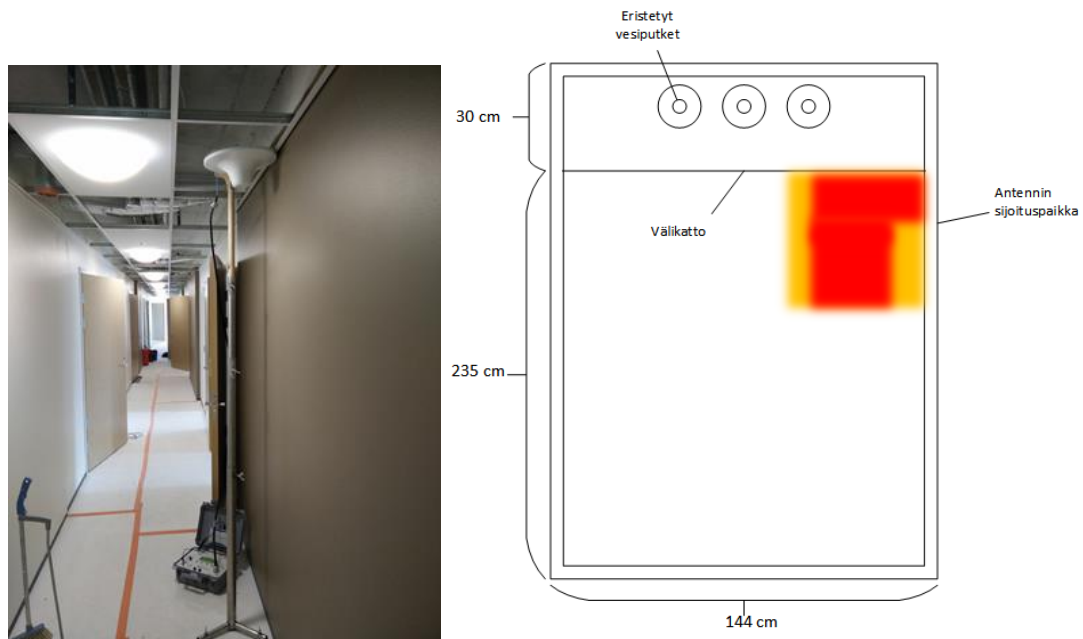
Kuva 3.13. Mittauskohteen 4 pohjakuva.

Taulukossa 3.1 on esitelty mittauskohteen 4 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 1. Taulukon arvoista nähdään, että mittaustulokset ovat olleet hyvin huonoja tässä paikassa.

Taulukko 3.1. Mittauskohteen 4 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 1.

Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
0 cm	-75	-67	-67	-83
5 cm	-76	-68	-81	-73
10 cm	-76	-74	-75	-81
15 cm	-80	-71	-87	-86
20 cm	-81	-75	-76	-86
25 cm	-85	-72	-76	-74
30 cm	-89	-72	-71	-72

Kuvasta 3.14 nähdään, että antennin sijoituspaikka 1 on kapealla käytävällä. Antennin yläpuolella kulkee käytävän suuntaisesti kolme eristettyä vesiputkea. Mittausten perusteella havaittiin, että tämän kaltainen tilanne on kaikista haastavin eli antenni sijaitsee kapealla käytävällä ja sen välittömässä läheisyydessä on metallia.

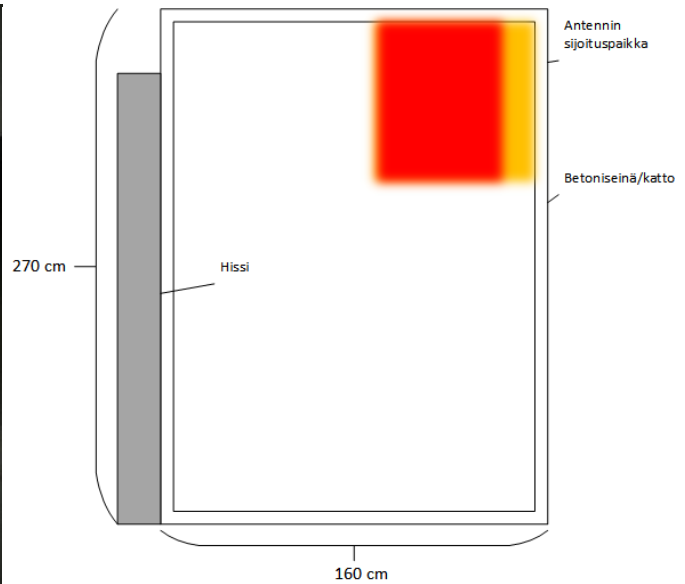


Kuva 3.14. Antennin sijoituspaikka 1 mittauskohteessa 4.

Antennin sijoituspaikka 2 eroaa täysin kahdesta muusta antennin sijoituspaikasta tässä mittauskohteessa. Kuvasta 3.15 nähdään, että antenni on sijoitettu hissien läheisyyteen portaikon eteen leveälle käytävälle. Antennin sijoituspaikan pitäisi siis olla suhteellisen hyvä, koska edes hissien ei pitäisi vaikuttaa mittaustuloksiin, sillä antenni oli sijoitettu vastakkaiselle puolelle käytävää. Taulukosta 3.2 voidaan kuitenkin havaita, että PIM-arvo on matalimmillaan -91 dBm, joka ei vielä täytä hyvän PIM-arvon ehtoja. Tämän mittauspaikan mittaustulosten perusteella havaitaan, että PIM käyttäytyy hyvin arvaamattomasti.

Taulukko 3.2. Mittauskohteen 4 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 2.

Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
0 cm	-87	-74	-71	-74	-81
5 cm	-86	-73	-72	-74	-71
10 cm	-77	-73	-76	-76	-74
15 cm	-76	-69	-77	-77	-84
20 cm	-78	-71	-71	-73	-77
25 cm	-87	-72	-70	-80	-72
30 cm	-91	-71	-70	-78	-73

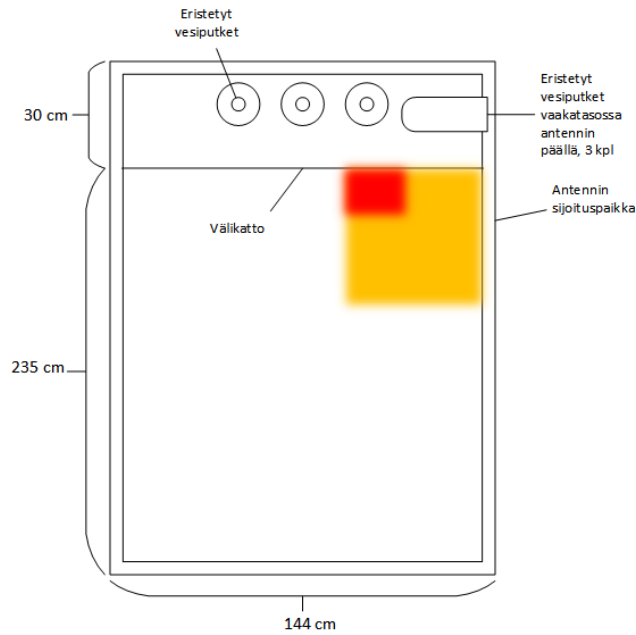


Kuva 3.15. Antennin sijoituspaikka 2 mittauskohteessa 4.

Antennin sijoituspaikka 3 eroaa sijoituspaikan 1 tilanteesta siten, että käytävän suuntaisesti menevien lämpöputkien lisäksi antennin yläpuolella menee vaakasuunnassa kolme lämpöputkea. Mittaustilannetta on havainnollistettu kuvassa 3.16. Antennin sijoituspaikka ei ole hyvä, kuten taulukon 3.3 arvoista ja kuvasta 3.16 voidaan havaita. Mittaustulokset ovat hyvin lähellä mittauspaikan 1 tuloksia, niin kuin olettaa saattaa.

Taulukko 3.3. Mittauskohteen 4 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 3.

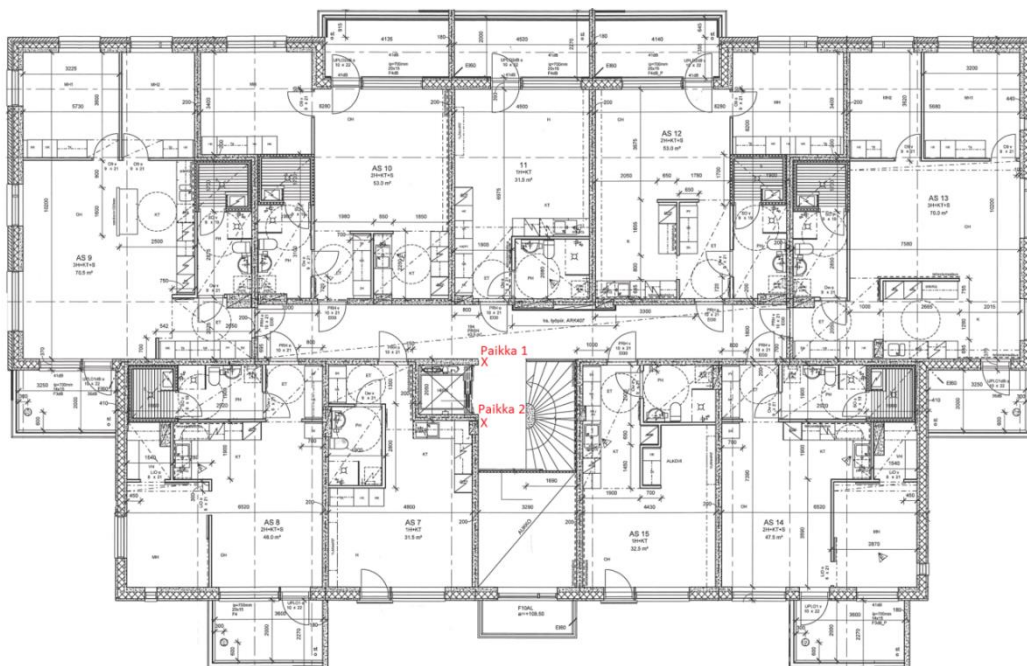
Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm
10 cm	-95	-84	-76
20 cm	-97	-93	-79
30 cm	-89	-92	-83
40 cm	-93	-92	-86
50 cm	-86	-90	-87



Kuva 3.16. Antennin sijoituspaikka 3 mittauskohteessa 4.

3.3.2 Mittauskohde 5

Kuvassa 3.17 on esitelty mittauskohteen 5 pohjakuva. Mittauspaikat ovat leveän käytävän alueella hissien läheisyydessä. Mittauspaikat valittiin leveän aulan alueelta, koska oletettiin, että PIM-arvot ovat tällä alueella matalimmat. Asuinrakennuksen käytävän alueella tehtiin myös pistomittauksia ja havaittiin, että siellä PIM-arvot olivat korkeampia kuin -100 dBm.

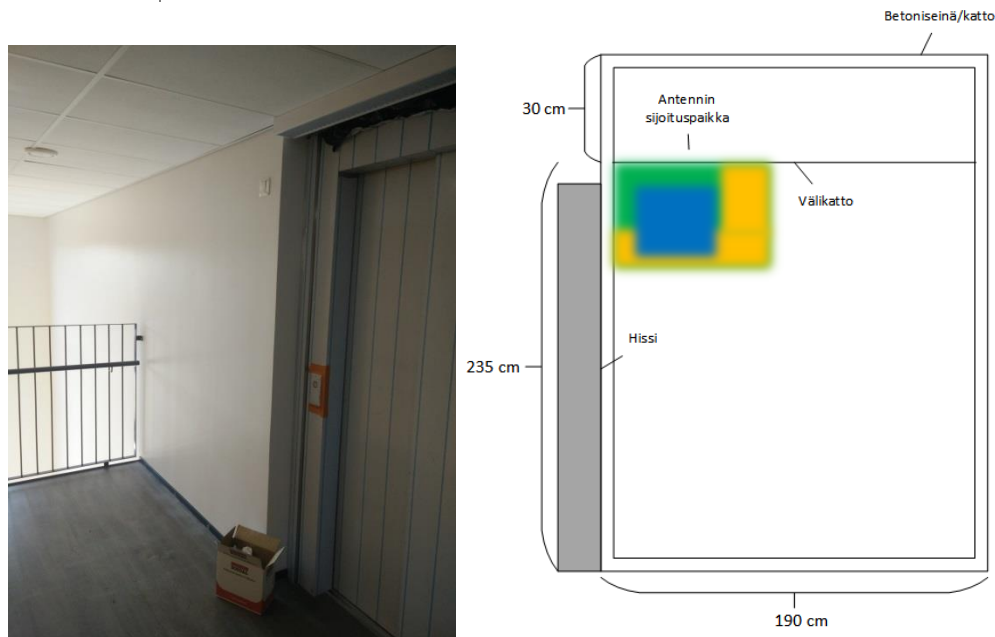


Kuva 3.17. Mittauskohteen 5 pohjakuva.

Antennien sijoituspaikat 1 ja 2 olivat hyvin samankaltaisia. Mittauspaikat olivat saman aulan alueella, mutta eri puolella ja etäisyydellä hissistä. Molemmissa sijoituspaikoissa saatiin hyviä ja huonoja tuloksia, kuten taulukoista 3.4 ja 3.5 voidaan havaita. Tässä tilanteessa antennin sijoitusalueella oli paikkoja, jossa tulokset olivat alle -100 dBm, joten kuviin 3.18 ja 3.19 on merkitty sinisellä värillä tulosten valossa antennin optimisijoituspaikka. Optimisijoituspaikka ottaa huomioon kaikkien mittausten tulokset, joten se saat-
taa osua osassa tilanteista huonon PIM-arvon omaavalle antennin sijoituskohdalle, kuten kuvan 3.18 tilanteessa. Antennit on sijoitettu mittaustulosten perusteella tarpeeksi kauas hissistä, sillä se ei näytä vaikuttavan mittaustuloksiin merkittävästi.

Taulukko 3.4. Mittauskohteen 5 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 1.

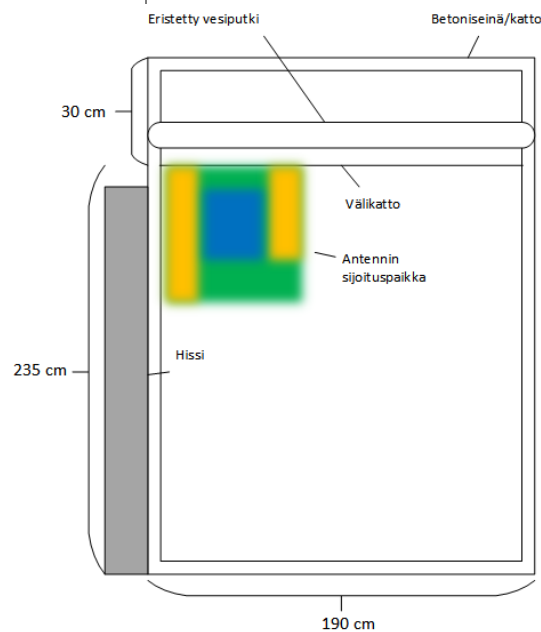
Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
15 cm	-119	-112	-106	-87	-96	-114	-97
25 cm	-101	-110	-100	-113	-	-	-
35 cm	-88	-95	-97	-107	-	-	-
45 cm	-93	-98	-96	-99	-	-	-



Kuva 3.18. Antennin sijoituspaikka 1 mittauskohteessa 5.

Taulukko 3.5. Mittauskohteen 5 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 2.

Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
0 cm	-97	-112	-97	-97
10 cm	-83	-110	-97	-89
20 cm	-94	-103	-117	-116
30 cm	-86	-113	-112	-110

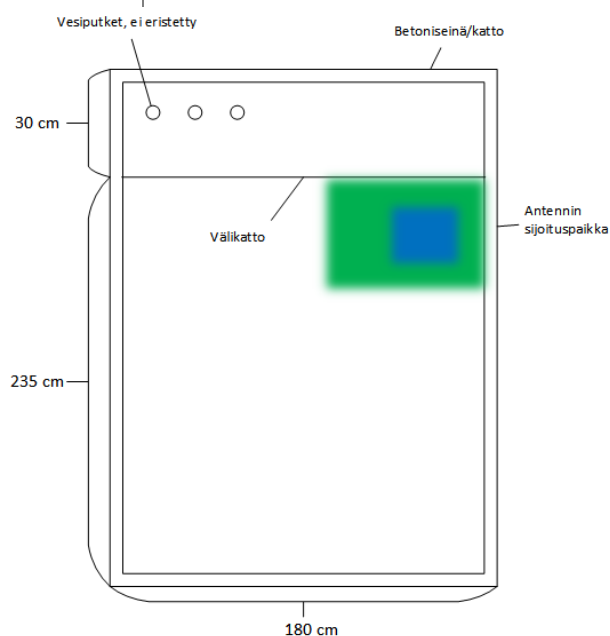
**Kuva 3.19.** Antennin sijoituspaikka 2 mittauskohteessa 5.

3.3.3 Mittauskohde 6

Kuvassa 3.20 on esitelty mittauskohteen 6 pohjakuva. Tämä mittauskohde oli mittaushetkellä muita mittauskohteita enemmän rakennusvaiheessa, kuten kuvasta 3.22 voidaan havaita. Rakennukseen ei ollut vielä asennettu viimeisimpiä pinnoitemateriaaleja, jonka vuoksi välikattoa eikä lämpöputkien eristeitä ollut vielä paikallaan. Asuinkerroksen käytävän leveys oli yli 160 cm. Antennien sijoituspaikkoja valittaessa pyrittiin löytämään asuinkerroksesta mahdollisimman erilaiset mittauspaiikat, joita löytyi tässä mittauskohteessa kaksi kappaletta.

Taulukko 3.6. Mittauskohteen 6 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 1.

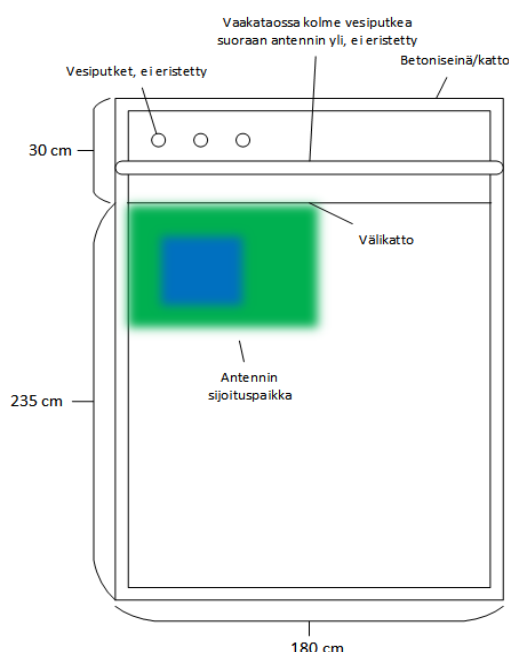
Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
0 cm	-105	-125	-102	-125	-106	-110
5 cm	-103	-125	-102	-125	-105	-106
10 cm	-102	-119	-101	-119	-105	-106
15 cm	-103	-125	-105	-117	-101	-106
20 cm	-107	-122	-106	-117	-101	-105
25 cm	-103	-123	-97	-119	-100	-105

**Kuva 3.21.** Antennin sijoituspaikka 1 mittaushetkellä 6.

Antennin sijoituspaikka 2 oli myös leveällä käytävällä, kuten kuvasta 3.22 nähdään, mutta tässä tilanteessa antennin yläpuolella kulki vaakatasossa ja käytävän suuntaisesti kolme vesiputkea. Vesiputket eivät olleet kuitenkaan eristettyjä, joka saattaa vaikuttaa mittaustuloksiin. Kuten jo aiemmin todettiin, tälläkin mittausalueella PIM-arvot olivat jokaisessa mittauspisteessä tarpeeksi alhaisia eli alle -100 dBm.

Taulukko 3.7: Mittauskohteen 6 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 2.

Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
0 cm	-124	-126	-	-	-	-
10 cm	-122	-125	-118	-122	-122	-125
20 cm	-123	-121	-122	-122	-125	-122
30 cm	-125	-126	-126	-124	-123	-124
40 cm	-126	-120	-120	-122	-124	-122

**Kuva 3.22.** Antennin sijoituspaikka 2 mittauskohteessa 6.

3.3.4 Mittauskohde 7

Kuvassa 3.23 on mittakohteen 7 pohjakuva. Antennien kolme sijoituspaikkaa olivat käytävän kapean käytävän varrella. Antennien kaksi ensimmäistä sijoituspaikkaa tässä kohteessa ovat muuten samanlaisia, mutta antennien yläpuolella on eri määrä eristettyjä vesiputkia, sillä antennit oli sijoitettu eri puolille asuinkerroksen käytävää. Antennin sijoituspaikka 3 eroaa kahdesta aikaisemmasta sijoituspaikasta siten, että siinä antennin yläpuolella oleva katto oli usean metrin verran korkeampana kuin kahdessa muussa sijoituspaikassa. Tämä tekee antennin sijoituspaikasta paljon tilavamman, vaikka se muuten sijaitsi kapealla käytävällä.

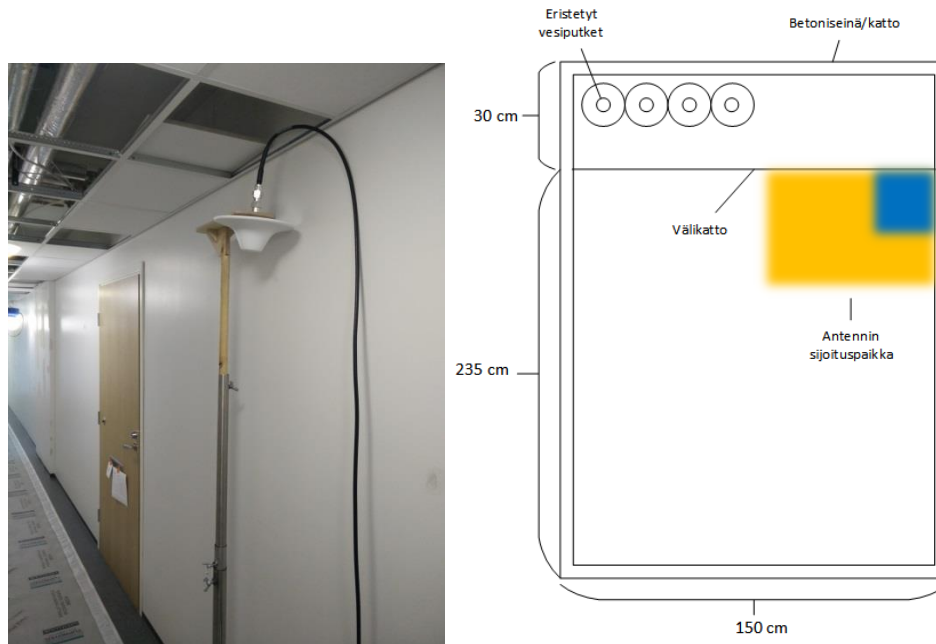


Kuva 3.23. Mittauskohteen 7 pohjakuva.

Kuvista 3.24 ja 3.25 nähdään, että antennien sijoituspaikat olivat hyvin samankaltaisia. Mittaustulokset olivat molemmissa tapauksissa pääasiassa huonoja, kuten taulukoista 3.8 ja 3.9 voidaan havaita. Taulukosta 3.9 nähdään, että antennin sijoituspaikassa 2 saatiin muutamia hyvin tuloksia, mutta suurin osa niistä oli korkeampia kuin -100 dBm. Tämä näyttää kuinka vaikea PIM:n arvoja on estimoida juuri kapeilla käytävillä.

Taulukko 3.8. Mittauskohteen 7 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 1.

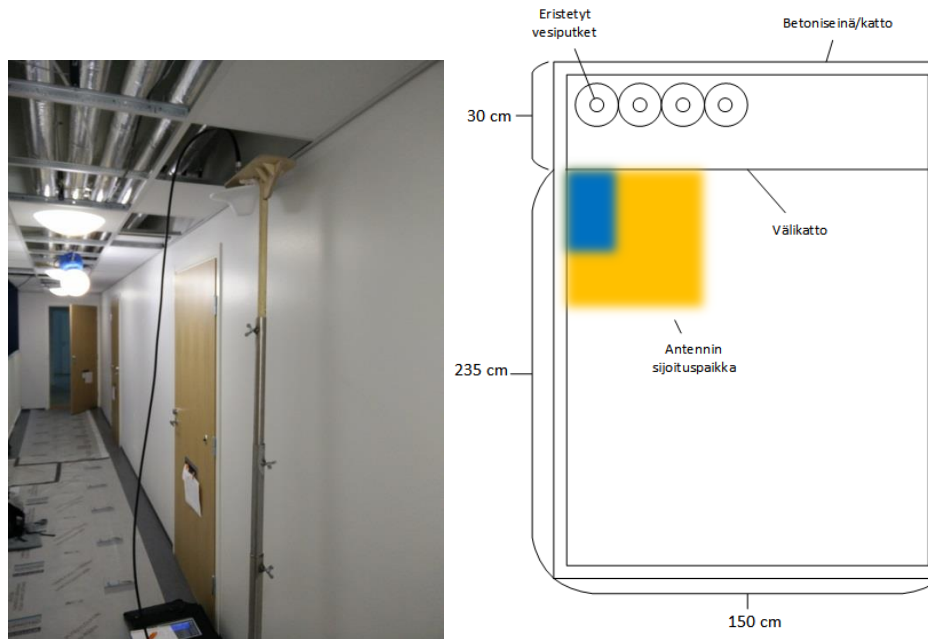
Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
0 cm	-92	-90	-79	-78	-80
5 cm	-102	-95	-86	-85	-94
10 cm	-96	-92	-92	-86	-92
15 cm	-96	-98	-96	-85	-89
20 cm	-94	-96	-95	-88	-94
25 cm	-91	-96	-95	-74	-97



Kuva 3.24. Antennin sijoituspaikka 1 mittauskohteessa 7

Taulukko 3.9. Mittauskohteen 7 mittau tulokset antennin sijoituspaikassa 2.

Etäi- syys	0 cm	10 cm	20 cm	35 cm
5 cm	-99	-100	-90	-88
10 cm	-107	-89	-85	-100
15 cm	-108	-83	-68	-96
20 cm	-107	-80	-77	-104
25 cm	-100	-82	-81	-120
30 cm	-102	-	-	-

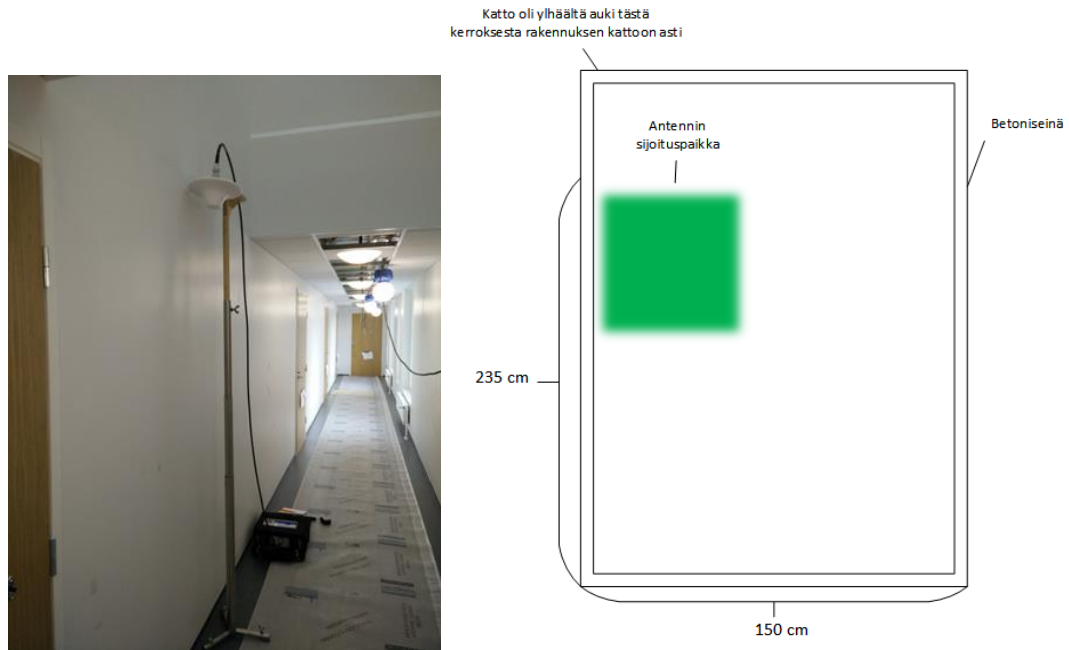


Kuva 3.25. Antennin sijoituspaikka 2 mittauskohteessa 7.

Antennin sijoituspaikka 3 erosi huomattavasti kahdesta aiemmasta mittauspaikasta kuten kuvasta 3.26 voidaan huomata. Mittauspaikka oli kapean käytävän varrella, mutta sijoituspaikan yläpuolella ollut katto oli monta metriä korkeampana kuin muissa sijoituspaikoissa. Taulukosta 3.10 voidaan havaita, että tällöin kaikki mittaustulokset olivat alle -100 dBm. Tämän perusteella havaitaan, että antennin ympäristön tilan suuruudella on merkittävä vaikutus PIM:n.

Taulukko 3.10. Mittauskohteen 7 mittaustulokset antennin sijoituspaikassa 3.

Etäisyys	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
0 cm	-113	-109	-115	-112
5 cm	-101	-108	-107	-107
10 cm	-101	-105	-108	-107
15 cm	-103	-107	-112	-109
20 cm	-107	-108	-108	-112
25 cm	-102	-103	-105	-106

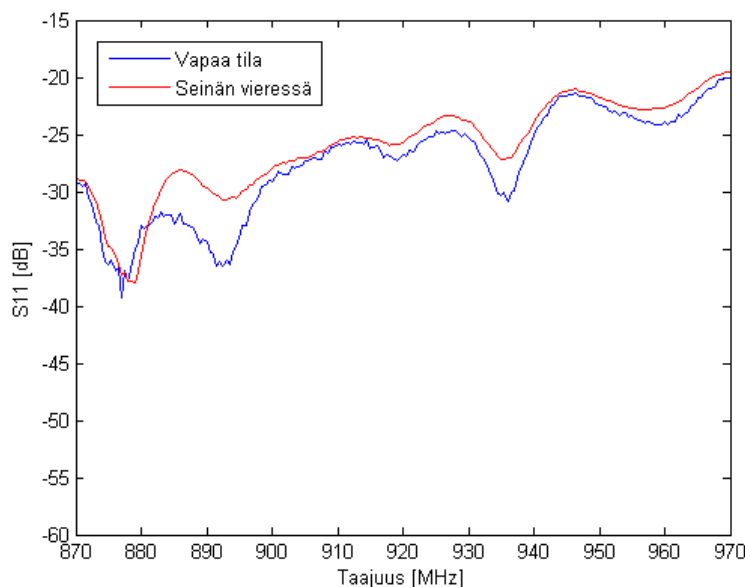


Kuva 3.26. Antennin sijoituspaikka 3 mittauskohteessa 7.

3.3.5 Antennin heijastuskertoimen tarkastelu verkkoanalyysatorilla

Heijastuskerroin (*reflection coefficient, S_{11}*) kuvaa kuinka paljon lähetetystä tehosta heijastuu takaisin siirtolinjassa. Heijastuskertoimen itseisarvo on välillä 0-1. Mikäli heijastuskerroin on nolla, kaikki teho siirtyy kuormaan, esimerkiksi antenniin. Heijastuskertoimen ollessa yksi, kaikki syötetty teho heijastuu takaisin.

Heijastuskerrointa tarkastellaan PIM-ongelman näkökulmasta sen takia, että katsotaan kuinka paljon heijastuskerroin muuttuu antennin sijoituspaikkaa vaihdettaessa. Kuvassa 3.27 on käsitelty kahta eri tilannetta, jossa heijastuskerrointa on mitattu. Heijastuskerroin on ilmoitettu yksikössä dB. Antenni on sijoitettu ensin ”vapaaseen tilaan”, jossa PIM-arvo on mittausten perusteella ollut riittävän matala (alle -100 dBm). Tämän jälkeen antenni on sijoitettu seinän viereen useaan eri kohtaan, joissa on tiedetty PIM:n olevan korkea ja laskettu mittausten keskiarvo. Kuvaan 3.27 on piirretty heijastuskerroin edellä mainitussa kahdessa tapauksessa taajuuden funktiona.

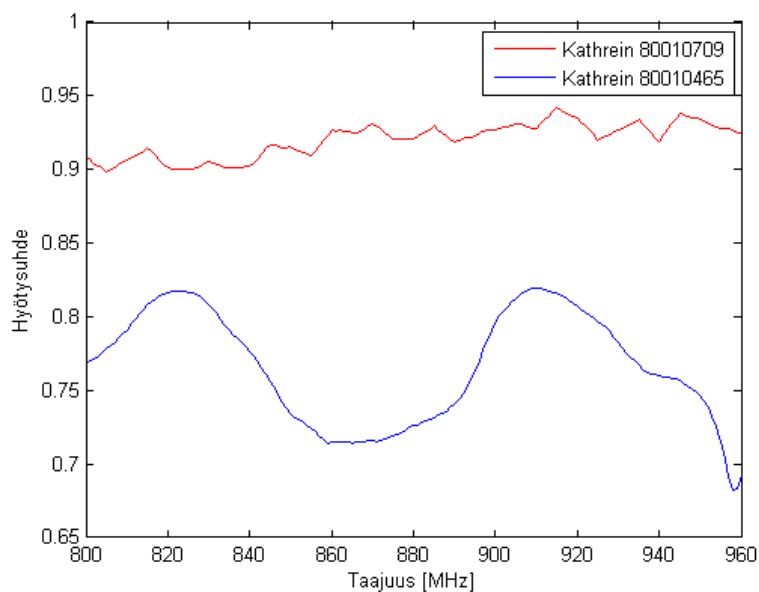


Kuva 3.27. Heijastuskerroin taajuuden funktiona kahdessa eri mittauskohdassa.

Kuvasta nähdään, että antennin sijoituspaikka vaikuttaa heijastuskertoimen suuruuteen. Ero on kuitenkin melko pieni. Heijastuskertoimen avulla voidaan laskea antennin VSWR. Mittauksessa käytettiin Kathrein 80010709 antennia, jonka VSWR:n pitäisi olla teknisten tietojen perusteella alle 2 mitatulla taajuuskaistalla [LIITE D]. Koko mittauskaistan VSWR:n keskiarvo vapaassa tilassa oli 1,088 ja seinän vieressä 1,10. Antenni käyttäytyy molemmissa sekä PIM:n suhteen huonossa että hyvässä kohdassa lähes samalla tavalla.

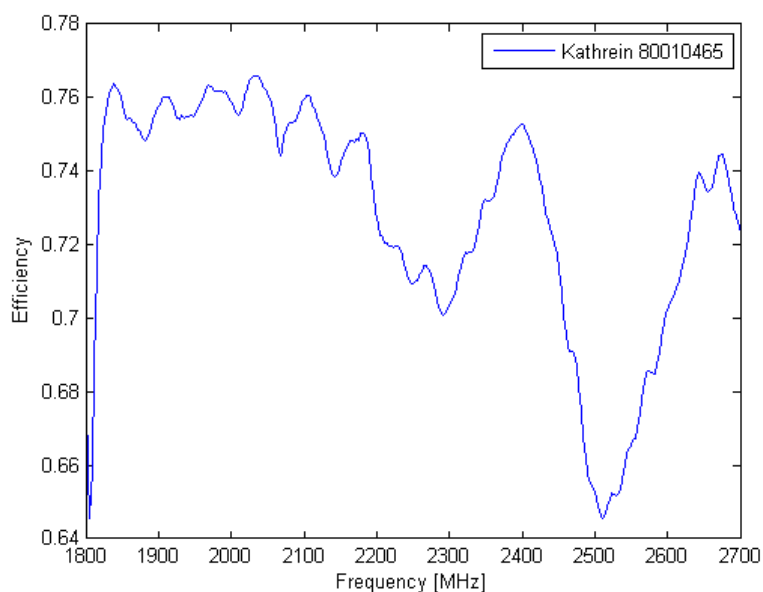
3.4 Antennien tehomittausten tulokset

Antennin todellisen säteilytehon mittaukset suoritettiin kahdella taajuusalueella: 800-960 MHz ja 1800-2700 MHz käyttäen kahta eri antennia. Tulokset on esitetty muodossa, jossa antennin hyötysuhde on piirretty taajuuden funktiona. Lautasantennilla (Kathrein 80010709) mittaukset suoritettiin ainoastaan alemmalla (800-960 MHz) taajuusalueella, sillä tämän antennin kalibrointiin sopivaa antennia ei ollut ylemmälle taajuuskaistalle. Kuvassa 3.28 on esitelty lautasantennin ja paneeliantennin (Kathrein 80010465) hyötysuhde 800-960 MHz taajuusalueella. Kuten kuvasta nähdään, hyötysuhde vaihtelee lautasantennin tapauksessa välillä 0.899-0.942. Hyötysuhteen keskiarvo on 0.92.



Kuva 3.28. Lautasantennin ja paneeliantennin hyötysuhde taajuuden funktiona taajuusalueella 800-960 MHz.

Kuvassa 3.29 on esitelty mittaustulokset paneeliantennin osalta taajuusalueella 1800-2700 MHz. Kuvista 3.28 ja 3.29 nähdään, että paneeliantennin hyötysuhde on alhaisempi kuin lautasantennin tapauksessa. Voidaan havaita, että mittaustulosten keskiarvo on molemmissa kaistoissa käyttäen paneeliantennilla hyvin samankaltainen. Alemmalla kaistalla hyötysuhteen keskiarvo on 0.76 ja korkeammalla kaistalla 0.73. Tästä voidaan päätellä, että lautasantenni saattaa toimia ylemmällä taajuuskaistalla samankaltaisesti kuin alemmalla kaistalla.



Kuva 3.29. Paneeliantennin hyötysuhde taajuuden funktiona taajuusalueella 1800-2700 MHz.

Edellä mainittujen antennin hyötysuhteen mittausten ja antennin heijastuskertoimen tarkastelun perusteella voidaan laskea mikä antennin syöttötehon tulisi olla, jotta saavutettaisiin 2 W:n säteilyteho. Taulukossa 3.11 on esitelty vaaditun syöttötehon suuruus. Tulokset on laskettu molempien antennien tapauksessa käyttäen molempia mitattuja taajuusalueita. Hyötysuhteen arvoksi on valittu tarkastellun taajuusalueen minimiarvo. Paneeli-antennin tapauksessa ylemmällä taajuusalueella hyötysuhde on valittu taajuusalueen alkupään minimiksi. SWR-arvo on saatu luvun 3.3.5 tarkastelun perusteella.

Taulukko 3.11. Antennin vaadittu syöttöteho, jotta saavutetaan 2 W:n säteilyteho.

Tilanne	Hyötysuhteen minimi	SWR	Syöttöteho
Kathrein 80010709 alempi kaista	0,8985	1,1	2,23 W
Kathrein 80010465 alempi kaista	0,7140	1,1	2,80 W
Kathrein 80010465 ylempi kaista	0,7440	1,1	2,69 W

4. TULOSTEN ANALYSOINTI

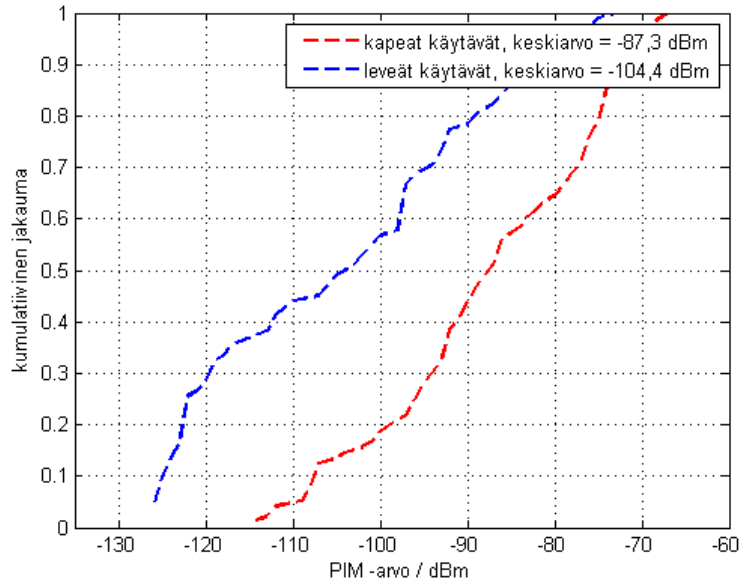
Tässä luvussa käsitellään luvussa kolme esiteltyjä mittaustuloksia. Mittaustuloksia pohditaan työn alussa esiteltyjen tutkimuskysymysten kautta. Luku 4 jakautuu kolmeen osaan: Antennien sijoituspaikan vaikutus, antennien määrä ja tulosten luotettavuus. Antennien sijoituspaikan pohdinnassa nostetaan esille mitkä olivat PIM-ongelman näkökulmasta haasteellisimmat antennin sijoituspaikkaan liittyvät ilmiöt. Tässä yhteydessä lisäksi annetaan antennien viitteellinen sijoituspaikkaohje kapean ja leveän käytävän tapauksessa. Antennien määrän tarkastelussa käytetään mittausten perusteella kalibroitua simulaattoria, jonka avulla tutkitaan, minkälaisia vaikutuksia antennien määrän lisäämisellä on asuinkerroksen peiton kattavuuteen. Lisäksi tuodaan kootusti esille, mitkä olivat ongelmallisimmat tilanteet simulaattorin ja mittausten välisen eron aiheuttajina. Tulosten luotettavuus osiossa mietitään ovatko tutkimuksessa käytetyt mittausten menetelmät olleet oikeat ja kuinka luotettavia tuloksia niillä on saatu.

4.1 Antennien sijoituspaikan vaikutus

Antennin sijoituspaikan vaikutusta tarkastellaan passiivisen keskinäismodulaation näkökulmasta. Kuten on jo aiemmin todettu, PIM:ta esiintyy aina nykyaikaisissa passiivisissa monioperaattoriverkoissa. Mikäli PIM-arvot ovat korkeita, ne saattavat häiritä järjestelmiä siinä määrin, että vastaanotettua signaalia ei ole enää mahdollista havaita. Tämä johtaa siihen, että järjestelmän solun kantama ja täten solun koko pienenee. Mittausten perusteella havaittiin, että antennin sijainnilla on merkittävä rooli PIM-arvon suuruuteen. Tutkimuksen perusteella löydettiin kaksi tekijää, joiden katsottiin vaikuttavan PIM-arvon suuruuteen antennin sijoituspaikan näkökulmasta:

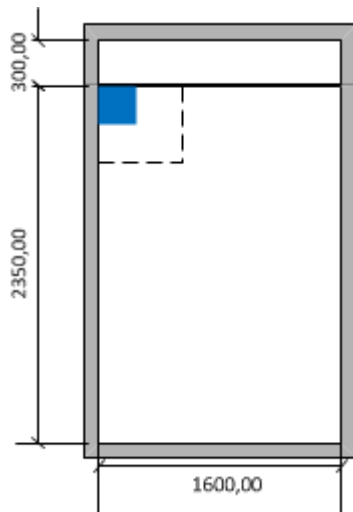
- Käytävän leveys
- Antennin läheisyydessä (lähikentässä) oleva metallinen materiaali

Mittaustulosten perusteella käytävän leveys jaettiin kahteen kategoriaan: Kapeat – ja leveät käytävät. Kapea käytävä on alle 160 cm leveä ja leveä käytävä on yli 160 cm leveä. Mittausten perusteella kapealla käytävällä PIM-arvot olivat selvästi korkeampia ja vaikeammin ennustettavissa olevia kuin leveän käytävän tapauksessa. Tilannetta on havainnollistettu kuvan 4.1 avulla. Kuvassa on esitetty PIM-arvojen kumulatiivinen jakauma kapean – ja leveän käytävän tapauksessa. Kuvasta voidaan havaita, että jakauman keskiarvo on noin 17 dB korkeampi kapealla käytävällä eli antennin asennuspaikalla on huomattava vaikutus PIM-arvojen suuruuteen.



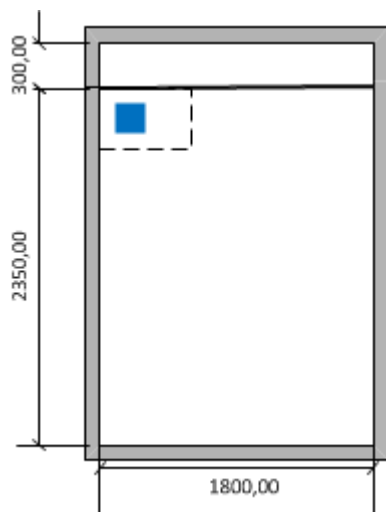
Kuva 4.1. PIM-arvojen jakautuminen.

Kuvassa 4.2 on esitetty antennin viitteellinen sijoituspaikka kapealla käytävällä. Antenni tulisi sijoittaa kuvan osoittaman sinisen värin alueelle, joka on 0-20 cm käytävän välikatosta ja käytävän seinästä. Kuvaan on merkitty käytävän korkeus ja leveys millimetreissä. Katkoviivalla on havainnollistettu millä alueella mittauksia suoritettiin.



Kuva 4.2. Antennin viitteellinen sijoituspaikka kapealla käytävällä.

Leveällä käytävällä PIM-arvot olivat pääasiassa hyviä, mutta joukossa oli myös poikkeuksia. Kuvassa 4.3 on esitetty antennin viitteellinen sijoituspaikka leveällä käytävällä. Antenni tulisi sijoittaa 15-30 cm käytävän välikatosta ja 10-30 cm käytävän seinästä. Mittauksissa välikaton korkeus oli välillä 30-40 cm, tällä mitalla ei ole kuitenkaan suurta merkitystä tarkastelun kannalta. Tärkeämmät mitat ovat käytävän korkeus välikattoon ja käytävän leveys.



Kuva 4.3. Antennin viitteellinen sijoituspaikka leveällä käytävällä.

Mittaustulosten perusteella havaittiin, että myös antennin lähikentässä olevan metallisen materiaalin määrällä on vaikutusta PIM-arvoihin. Metallinen materiaali muuttaa antennin suunniteltuja ominaisuuksia, ja täten nostaa PIM-arvojen suuruutta. Antenni sijoitetaan yleensä asuinkerroksen käytävän alueelle, jonka välikaton alle on sijoitettu muun muassa vesiputkia ja sähköhylyjä. Vesiputket ovat kuparisia putkia, jotka on päällystetty eristevillalla ja foliopinnoitteella. Suurimmassa osassa nykyaikaisia kerrostaloja käytetään hormoneja, joita pitkin tuodaan sähkö – ja tietoliikennekaapelit asuntoihin. Muutamissa mitauskohteissamme sähköhylyt kuitenkin kulkivat vielä välikaton alla. Lisäksi sisäseinien rakenteissa käytetään yleisesti ottaen metalliseoksia.

Tässä tutkimuksessa PIM-mittarien lähetystehona käytettiin 33 dBm ja ne mittasivat PIM:n suuruutta GSM900-taajuusalueella. Kun halutaan tarkastella kuinka paljon mitatut PIM-arvot todellisuudessa vaikuttavat järjestelmään, tulee käytetty teho suhteuttaa käytettyyn kaistanleveyteen. Mikäli oletetaan, että PIM-mittarien lähettämän signaalin kaistanleveys on 200 kHz, saadaan laskettua kuinka suuri teho on eri kaistanleveyksillä. Jos tarkastellaan UMTS-järjestelmää, jonka käyttämä kaistanleveys on 3,84 MHz, lähetystehon suuruus on tällöin 20,18 dBm. Lähetysteho laskee siis 33 dBm:stä 9,82 dB:iä. Tämä tarkoittaa, että PIM-arvot laskevat 24 dB:ä (2,46 dB/dB) [16, s. 5].

PIM:n vaikutusta käytettyyn järjestelmään voidaan tarkastella myös power budgetin avulla. Taulukossa 4.1 on esitetty kuinka paljon PIM vaikuttaa vastaanottimen herkkyyteen käyttäen kahta korkeaa PIM-arvoa. Kuten taulukosta nähdään, PIM-arvo on sijoitettu kohinatason (*Noise power at receiver*) kohdalle, mikäli se ylittää järjestelmän kohinatason -100 dBm. Taulukon mukainen esimerkki on laskettu UMTS-järjestelmälle puheytyydellä.

Taulukko 4.1. PIM:n vaikutus vastaanottimen herkkyyteen.

General info					
	Unit	Value			
Frequency	Mhz	2100			
Chip rate	Mcps	3,84			
Temperature	K	290			
System bandwidth	MHz	5,00			
Service profile	Unit	Downlink			
Load	%	0,75			
Bit rate	kbps	12,2			
Receiving end	Unit	Mobile	Mobile (PIM)	Mobile (PIM)	Mobile (PIM)
Noise figure	dB	8	8	8	8
Noise power at receiver	dB	-100,2	-90	-80	-80
Cell Interference margin	dB	6,02	6,02	6,02	6,02
Total interference level	dBm	-94,2	-84,0	-74,0	-74,0
Required Eb/No	dB	6,1	6,1	6,1	6,1
Processing Gain	dB	24,9	24,9	24,9	24,9
Antenna diversity gain	dB	0	0	0	0
SHO diversity gain	dB	3	3	3	3
Power control headroom	dB	0	0	0	0
Required C/I	dB	-21,8	-21,8	-21,8	-21,8
Receiver sensitivity	dBm	-116,0	-105,8	-95,8	-95,8

Järjestelmän Eb/No on valittu puheyhteydelle käyttäen taulukossa mainittua tiedonsiirtonopeutta. Mobiililaitteen kohinaluvuksi on valittu 8 dB [6, s. 268]. Taulukosta voidaan havaita, että mikäli PIM-arvon suuruus on -100 dBm, joka valittiin sallitun PIM-arvon rajaksi, se ei nouse vielä järjestelmän oman kohinatason yläpuolelle. Mikäli PIM-arvo nousee yli -100 dBm, siitä tulee rajoittava tekijä, joka heikentää vastaanottimen herkkyyttä. Tämä tarkoittaa, että mobiilivastaanotin ei pysty enää vastaanottamaan signaalia suunnitellulla lähetysteholla. Se laskee kyseisen solun kokoa, jonka vuoksi solun reunalueet saattavat jäädä ilman kunnollista peittoa. Power budjetissa vastaanottimen herkkyyks on laskettu käyttäen järjestelmän kohinatasoa -100 dBm sekä PIM-arvoja -90 dBm ja -80 dBm.

Antennin todellista säteilytehoa tutkiessa havaittiin, että ideaalisessa ympäristössä käytetyillä testiantenneilla antennin hyötysuhde vaihteli hyvin paljon. Lautasantennilla (Kathrein 80010709) koko mitatun kaistan hyötysuhde oli 0.92, joka huomattavasti korkeampi kuin paneeliantennin (Kathrein 80010465) tapauksessa, missä hyötysuhde oli noin 0.75. Lautasantennin tilanteessa hyötysuhteen hajonta oli selkeästi pienempi kuin paneeli-

antennilla. Todellisuudessa hyötysuhde on tietenkin alhaisempi kuin ideaalisessa ympäristössä. Tämä havaittiin, kun antennin heijastuskertoimia tutkittiin verkkoanalysaattorin avulla. Mittauksessa kävi ilmi, että mikäli antenni sijoitetaan paikkaan, jossa PIM-arvot ovat korkeita, suurempi osa lähetystehosta heijastuu takaisin. Taulukkoon 4.2 on laskettu kuinka paljon syöttötehon tulisi olla, jotta saavutetaan suurin sisätiloissa sallittu lähetysteho 2 W (33 dBm).

Taulukko 4.2. Vaaditun syöttötehon suuruus.

Tilanne	Syöttöteho (W)	Syöttöteho (dBm)
Kathrein 80010709 alempi kaista	2,23	33,48
Kathrein 80010465 alempi kaista	2,80	34,47
Kathrein 80010465 ylempi kaista	2,69	34,20

4.2 Antennien määrä

Mittaustulosten perusteella löydettiin erityisiä alueita, joilla kenttämittausten ja simulaattorin arvioiman signaalin voimakkuuden välillä oli huomattavia eroja. Näitä alueita olivat:

- Asuinkerroksen reunamat
- Päätyasunnot
- Paljon vaimentavan elementin takana olevat alueet
- Osan elementtien vaimennusta on vaikea tulkita, esimerkiksi pakastinjääkääppi-yhdistelmä.

Asuinkerroksen reunamat olivat haastavia alueita. Näillä alueilla simulaattori oli arvioinut osassa tilanteista signaalin voimakkuuden voimakkaammaksi kuin todellisuudessa mitattu arvo ja osassa tilanteista heikommaksi. Näillä alueilla etäisyys antennista on suurin, joka aiheuttaa virhettä. Lisäksi nämä alueet ovat usein monen vaimentavan elementin takana, jonka vuoksi virhe saattaa kertaantua.

Päätyasuntojen tapauksessa oli havaittavissa, että simulaattori arvioi signaalin voimakkuuden todellisuutta huonommaksi. Tämä johtuu siitä, että simulaattorin käyttämä malli ei ota huomioon tehokkaasti heijastuksia, joita todellisuudessa tulee tunneliefektin johdosta paljon juuri käytävien päädyssä oleviin huoneistoihin.

Osan elementtien vaimennusta on vaikea tulkita. Tämän kaltaisia elementtejä olivat muun muassa pakastinjääkääppi-yhdistelmä ja keittiö. Mikäli mitatussa vaimennusarvossa, jota käytettiin simulaattorissa, on eroa todelliseen vaimennusarvoon, tämä näkyy suoraan kenttämittausten ja simulaattorin signaalin voimakkuuden erona mittaustuloksissa.

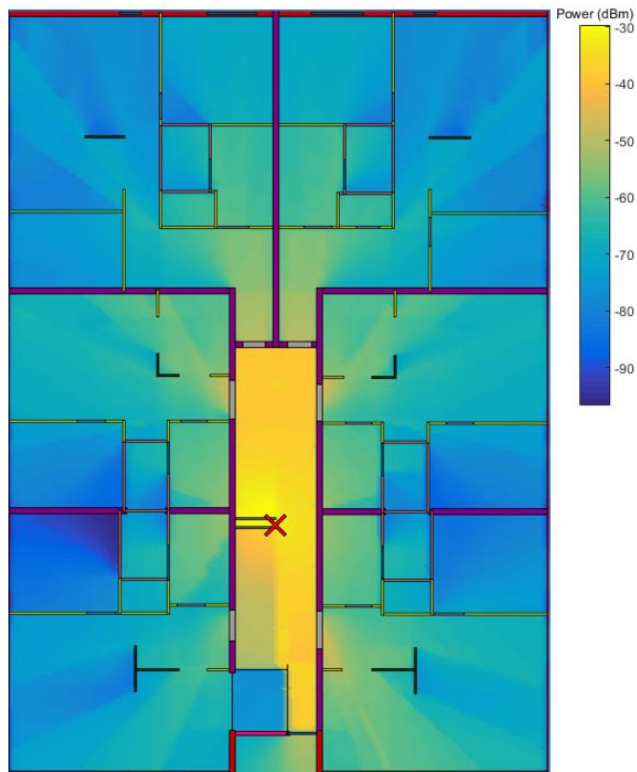
Yhteen asuinkerrokseen tarvittavien antennien määrää voidaan tutkia käyttämällä mittausten avulla kalibroitua WinProp-simulaattoria. Seuraavassa on tutkittu mitä etuja saadaan antennien määrän lisäämisellä. Asiaa on tutkittu kahdessa aikaisemmin esitellyssä mittauskohteessa (mittauskohde 1 ja mittauskohde 3) 2100 MHz taajuudella. Tulokset ovat esitetty peittokarttoina, joiden oikealla puolella on mitta-asteikko. Kuviin on merkitty antennien sijainnit punaisella rastilla. Simulaatiotapauksissa käytetty kokonaislähetysteho on 20 dBm, jota käytettiin myös alkuperäisissä peittomittauksissa ja simulaatioissa. Oletetaan, että käytetään UMTS:n hyödyntämää 5 MHz:n kaistanleveyttä. Lisäksi käyttäjän vastaanottimen kohinaluvun oletetaan olevan 8 dB. Tällöin systeemin kohinataso alalinkin suuntaan on -100,2 dBm [6, s. 268].

Mittauskohteen 1 koko on 17x23 m ja mittauskohteen 3 koko on 21x29 m. Tämän kokoisissa rakennuksissa voidaan mittaustulosten perusteella saavuttaa koko asuinkerroksen kattava peitto STUK:n asettaman säteilyrajoitteen (33 dBm) puitteissa käyttäen vain yhtä antennia asuinkerrosta kohti. Mikäli antennien määrää lisätään, saavutetaan kuitenkin tasaisempi vastaanotetun signaalin voimakkuus asuinkerroksessa. Lisäksi lisäämällä antennien määrää saadaan parannettua vastaanotetun signaalin voimakkuutta huomattavasti alueilla, joilla se oli huono yhden antennin tapauksessa.

4.2.1 Mittauskohteen 1 peitto 1-3 antennilla 2100 MHz:n taajuudella

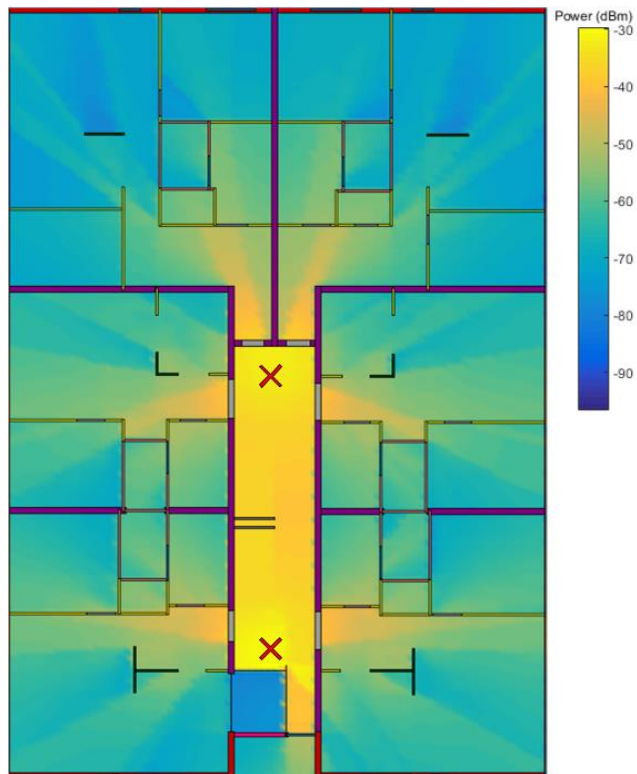
Yhden antennin asentamisella asuinkerroksen keskelle saatiin lähes koko kerroksen kattava peitto käyttäen 20 dBm:n tehoa. Kuten kuvasta 4.4 nähdään, signaalin voimakkuus on matalimmillaan noin -95 dBm. Käytettäessä useampaa antennia (2 tai 3) saavutettiin kuitenkin tasaisempi peitto.

Kuvassa 4.4 on esitelty tilanne, jossa asuinkerrokseen on asennettu ainoastaan yksi antenni keskelle asuinkerroksen käytävää. Tässä tilanteessa huomataan, että signaalin voimakkuus antennin tasossa olevissa huoneissa on matalin. Tämä johtuu siitä, nämä huoneet ovat usean vaimentavan seinän takana, eikä sinne ole suoraa reittiä esimerkiksi huoneistojen ovien kautta. Näissä tiloissa signaalin voimakkuus on huonoimmillaan -97 dBm. Muissa tiloissa signaalitaso ei laske alle -80 dBm:n muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Voidaan siis todeta, että mikäli asuinkerroksen peitto halutaan tasata, antennit tulisi sijoittaa siten, että signaali pääsisi etenemään tehokkaasti myös asuinkerroksen keskellä oleviin huoneisiin.



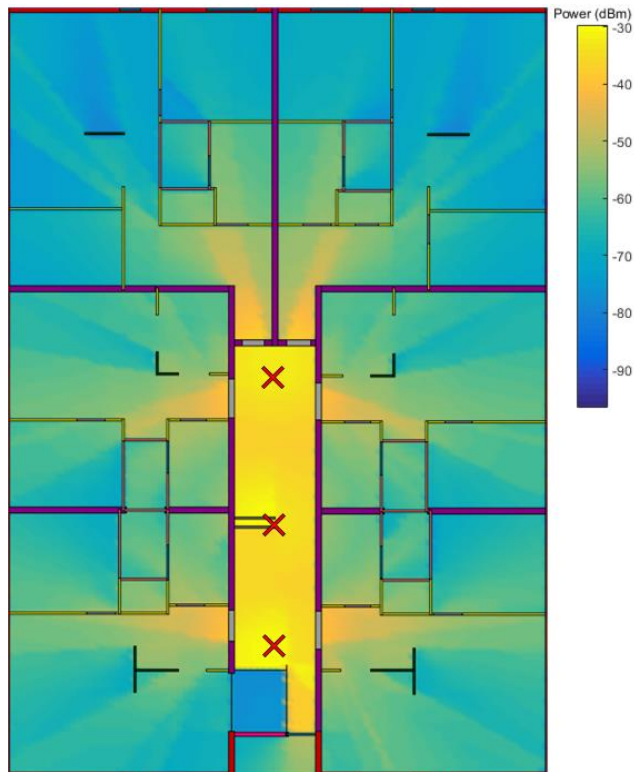
Kuva 4.4. Asuinkerrokseen sijoitettu yksi antenni mittauskohteessa 1.

Kuvan 4.5 mukaisessa tilanteessa asuinkerrokseen on sijoitettu kaksi antennia. 20 dBm:n kokonaislähetysteho on jaettu kahden antennin kesken, joten antennien lähetysteho on 17 dBm. Antennit on sijoitettu käytävän päätyihin, jotta niistä lähetetty signaali pääsisi etenemään tehokkaammin kuvan 4.4 osoittamiin haastaviin alueisiin. Kuten kuvasta 4.4 nähdään, antennit on lisäksi sijoitettu siten, että ne ovat huoneistojen ovien edessä. Ovien vaimennus on huomattavasti matalampi kuin huoneistojen seinien. Tulosten perusteella havaittiin, että antennin lisäämisellä ja uudella sijoittelulla saatiin parempia tuloksia kuin yhden antennin tapauksessa. Päätyasuntojen reunoilla (olohuone/keittiö) signaalin voimakkuus oli 3-4 dB:ä parempi kuin yhden antennin tilanteessa. Lisäksi asuinkerroksen keskikohdalla olevien huoneiden signaalitasot olivat 12-17 dB:ä korkeampia kun käytettiin kahta antennia. Kahta antennia käyttäen pystyttiin siis saavuttamaan huomattavasti tasaisempi peitto koko asuinkerrokseen sekä parantamaan vastaanotetun signaalin voimakkuutta haastavilla alueilla asuinkerroksen keskiosassa.



Kuva 4.5. Asuinkerrokseen sijoitettu kaksi antennia mittauskohteessa 1.

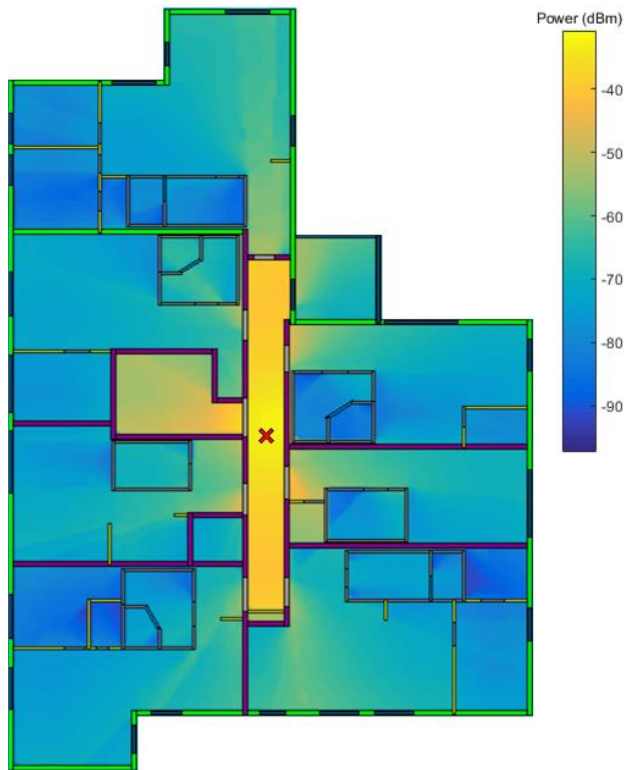
Vertailun vuoksi tilannetta on vielä tarkasteltu lisäämällä käytävälle kolmas antenni aivan käytävän keskelle, kuten kuvasta 4.6 nähdään. Tällöin yhden antennin lähetysteho on noin 15,2 dBm. Niin kuin voidaan olettaa, kolmannen antennin lisäämisellä ei saada mitään hyötyä peiton kannalta tässä rakennuksessa. Signaalin voimakkuus on korkeampi ainoastaan käytävän osalta, joka ei tuo käyttäjien kannalta lisäarvoa, sillä suurin osa mobiililaitteiden käytöstä tapahtuu tietenkin huoneistojen sisällä. Kolmannella antennilla ei siis saada hyötyä tässä tapauksessa, mutta mikäli käytävä olisi pidempi ja rakennuksessa olisi enemmän huoneistoja, tilanne muuttuu huomattavasti.



Kuva 4.6. Asuinkerrokseen sijoitettu kolme antennia mittauskohteessa 1.

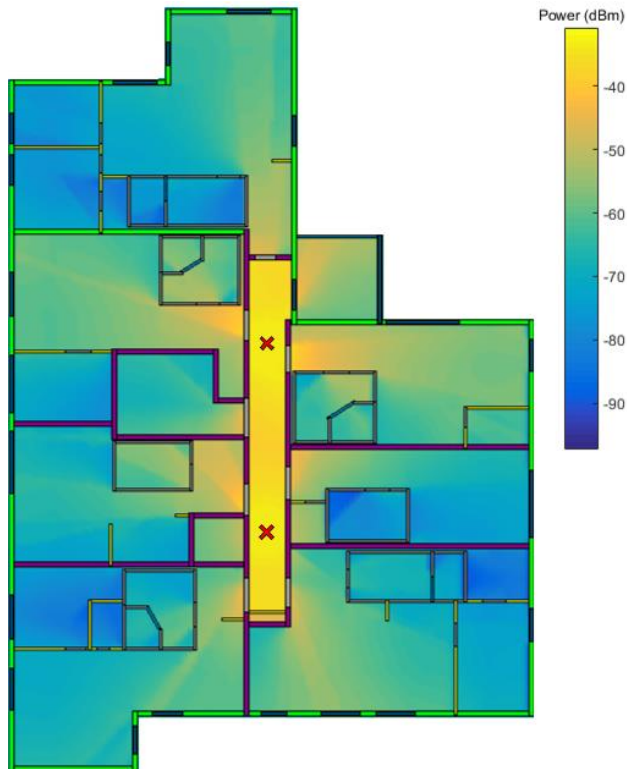
4.2.2 Mittauskohteen 3 peitto 1-3 antennilla 2100 MHz:n taajuudella

Mittauskohteen 3 tapauksessa yhdellä antennilla, joka oli sijoitettu asuinkerroksen käytävän keskelle, ei saavuteta koko kerroksen kattavaa peittoa, kuten kuvasta 4.7 voidaan havaita. Signaalin voimakkuus oli matalimmillaan noin -100 dBm. Tässä tapauksessa matalimmat vastaanotetun signaalin voimakkuudet ovat päätyasuntojen alueella. Nämä huoneet ovat kaukana lähetyksantennista sekä lisäksi ne ovat paljon vaimentavien rakenteiden takana, muun muassa WC-elementin takana. Muilla alueilla signaalin voimakkuus on yli -80 dBm, joka on hyväksyttävä taso kohinatason ollessa -99 dBm.



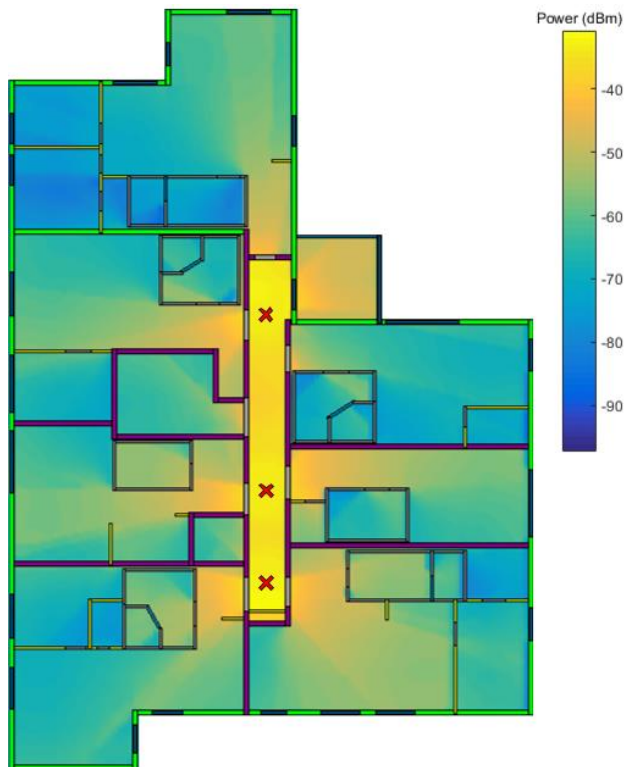
Kuva 4.7. Asuinkerrokseen sijoitettu yksi antenni mittauskohteessa 3.

Kuvan 4.8 mukaisessa tilanteessa asuinkerroksen käytävään on sijoitettu kaksi antennia. Antennit on sijoitettu siten, että niiden avulla voitaisiin saavuttaa paremmin kuvan 4.7 mukaiset haastavat alueet. Antennit on sijoitettu lähelle päätyasuntoja, niin että ne kuitenkin ovat suhteellisen lähellä keskiasuntojen sisäänkäyntejä. Tämän kaltaisella järjestelyllä on saavutettu 5-10 dB:ä korkeampi vastaanotetun signaalin voimakkuus päätyasuntojen haastavien huoneiden osalta verrattuna yhden antennin tilanteeseen. Lisäksi vastaanotetun signaalin voimakkuus on parantunut myös keskiasuntojen osalta keskimäärin noin 5 dB:ä.



Kuva 4.8. Asuinkerrokseen sijoitettu kaksi antennia mittauskohteessa 3.

Kuvasta 4.9 voidaan havaita, että tässä mittauskohteessa käytävä on huomattavasti pidempi ja huoneistojen sisäänkäynnit ovat jakautuneet tasaisemmin koko käytävän pituudelle kuin mittauskohteessa 1. Tässä tilanteessa käytävään on sijoitettu kolmas antenni keskelle käytävää ja käytävän päädyissä olevia antennia on viety hieman lähemmäs käytävän päätyjä ja näin ollen lähemmäksi niiden läheisyydessä olevien huoneistojen sisäänkäyntejä. Kuvasta 4.9 nähdään, että signaalin voimakkuus on hyvin tasainen, eikä signaalin voimakkuus laske alle -80 dBm:n muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Suurin parannus saatiin kuvan 4.9 alalaidassa olevien huoneiden signaalinvoimakkuuksiin. Signaalin voimakkuus oli n. 10 dB:ä parempi kuin kahden antennin tapauksessa.



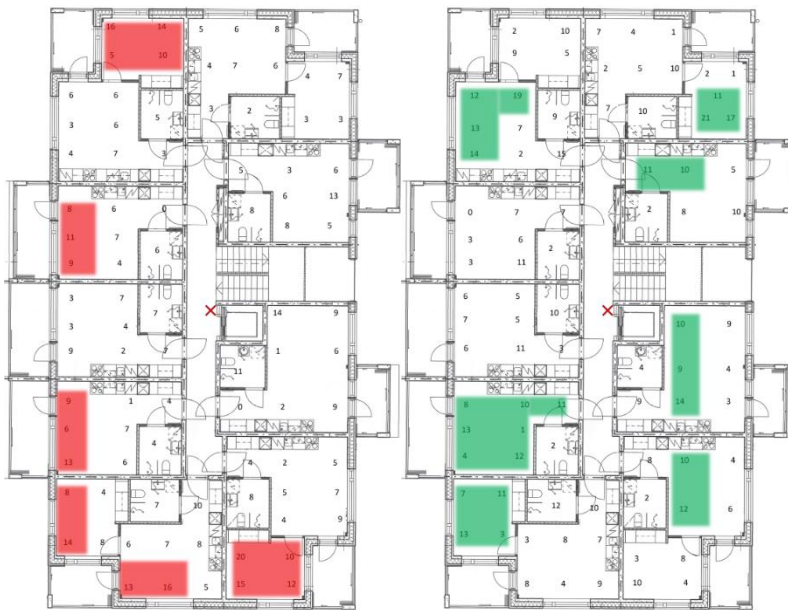
Kuva 4.9. Asuinkerrokseen sijoitettu kolme antennia mittaushetkellä 3.

4.3 Tulosten luotettavuus

Tässä alaluvussa pohditaan ovatko käytetyt mittaussuunnitelmat ja laitteet olleet oikeanlaiset tämänlaiseen tutkimukseen. Aluksi pohditaan lyhyesti onko PIM-ongelman tarkastelu järkevää tutkimuksessa käytetyillä menetelmillä. Tämän jälkeen tuodaan esille ovatko peittomittausten mittaus tulokset olleet parempia, kun on käytetty todellisia materiaalien vaimennusarvoja simulaattorin oletusarvojen sijaan.

Passiivisen keskinäismodulaation suuruutta tutkittiin käyttäen kaupallisia PIM-mittareita. Tutkimuksessa käytettyjen PIM-mittarien käyttö on todellisuudessa ainoa mahdollinen tapa toteuttaa PIM-mittauksia rakennuksissa. Mittarin tulee olla helposti liikuteltava, jotta sen kanssa voidaan liikkua vaivatta paikasta toiseen. Mittarin tulee myös olla kestävä, jotta sitä voidaan liikutella huoletta käyttöolosuhteissa. Mittareissa IM3:n mittauksen epätarkkuus oli ± 2 dB. PIM21-Mittari ilmoitti IM3:n suuruuden yhden desibelin tarkkuudella. PIM-Master:lla IM3:n suuruus ilmoitettiin 0.1 dB:n tarkkuudella ja pyöristettiin lähimpään kokonaislukuun. Mittarien yhteydessä toimitettiin laadukkaat komponentit, jotka minimoivat niissä mahdollisesti syntyvän PIM-särön suuruuden. Mittarien pakettiin kuului lisäksi momenttiavain, jolla komponentit saatiin kiinnitettyä toisiinsa optimaalisella voimakkuudella. Näiden mittaustarvikkeiden avulla voitiin olla varmoja, että PIM:n suuruuteen vaikuttaisi ainoastaan antenniin liittyvät ilmiöt.

Kuvissa 4.10 ja 4.11 on vertailtu kuinka paljon mittausten ja simulaattorin välillä on eroa kun on käytetty mitattuja vaimennusarvoja ja kun on käytetty simulaattorin oletusvaimennusarvoja. Kuvassa 4.10 on mittauskohde 2 käyttäen 2100 MHz:n taajuutta ja kuvassa 4.11 on mittauskohde 3 käyttäen 2100 MHz:n taajuutta. Kuvien vihreä väri tarkoittaa, että simulaattori on arvioinut signaalin voimakkuuden huonommaksi kuin mitattu arvo. Punainen väri tarkoittaa, että simulaattori on arvioinut signaalin voimakkuuden paremmaksi kuin mitattu arvo. Simulaatiot toteutettiin käyttäen ympärisäteilevää antennia. Simulaattorin avulla olisi voinut myös suunnitella käytetyn antennin säteilykuvion. Tätä ei kuitenkaan tehty, sillä antennin todellisen säteilykuvion määrittäminen sisätilassa on erittäin haastavaa, koska antennin lähikentässä olevat objektit vaikuttavat merkittävästi säteilykuvioon.



Kuva 4.10. Vasemman puoleinen kuva on mitatuilla vaimennuksilla ja oikeanpuoleinen kuva on simulaattorin oletusvaimennuksilla (Mittauskohde 2).

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa pyrittiin löytämään käytännön viitearvoja, joiden avulla voitaisiin helpottaa muun muassa antennin sijoituspaikan valintaa sisäverkoissa. Tutkimuksen lähtötietoina oli, että passiivinen keskinäismodulaatio on erittäin haastava ja ongelmallinen ilmiö nykyaikaisissa passiivisissa monioperaattoriverkoissa. Mikäli PIM-arvot ovat korkeampia kuin käytetyn järjestelmän kohinataso, PIM nousee järjestelmää rajoittavaksi tekijäksi. Tämä johtaa siihen, että järjestelmän solun kantama ja täten solun koko pienenee. Erityisesti käytävän leveys ja lähetysantennin lähikentässä oleva metallinen materiaali vaikuttavat PIM-arvon käyttäytymiseen. Mittaustulosten perusteella voitiin kuitenkin löytää lähetysantennille viitteellinen sijoituspaikkaohje sisäverkossa käytävän varrella. Kapean käytävän (käytävän leveys alle 160 cm) tilanteessa antenni tulisi sijoittaa 0-20 cm etäisyydelle käytävän välikatosta ja seinästä. Leveän käytävän tapauksessa (käytävän leveys yli 160 cm) antenni tulisi sijoittaa 15-30 cm etäisyydelle välikatosta ja 10-30 cm etäisyydelle seinästä.

Tutkimuksessa kalibroitiin kenttämittausten tulosten perusteella kaupallinen simulaatio-ohjelma, jonka avulla tutkittiin kuinka monta antennia tarvitaan kattamaan yhden asuinkerroksen pinta-ala. Säteilyturvakeskus on määrittänyt, että asuinkerroksen käytävässä yli 2 metrin korkeudessa olevan antennin maksimilähetysteho saa olla 33 dBm eli 2 W. Mittaustulosten perusteella voidaan sanoa, että tällä lähetysteholla pystytään saavuttamaan koko kerroksen kattava peitto mittaushaasteiden kokoisissa rakennuksissa. Mikäli käytettävissä oleva lähetysteho jaetaan useamman antennin kesken, voidaan kuitenkin tarjota tasaisempi peitto koko asuinkerroksen alalle. Lisäksi antennien lisäämisellä voidaan saavuttaa huomattavasti parempi vastaanotetun signaalin voimakkuustaso asuinkerroksen reuna-alueille ja usean vaimentavan elementin takana oleville alueille.

Antennin todellisen säteilyn määrän arvioiminen osoittautui haasteelliseksi. Antennin hyötysuhde riippuu voimakkaasti käytetystä antennista ja sen ominaisuuksista. Mittaustulosten perusteella voidaan kuitenkin havaita, että antennin hyötysuhde on keskimäärin noin 80 %. Lisäksi antennin sijoittaminen sisätiloihin laskee tätä arvoa, sillä antennin lähikentässä oleva metallinen materiaali vaikuttaa negatiivisesti antennin ominaisuuksiin. Mittaustulosten perusteella saatiin myös selville, että mittauksissa käytetyillä antennilla syöttötehon tulisi olla väliltä 2,23-2,80 W, mikäli halutaan saavuttaa Säteilyturvakeskuksen asettama sisätilan suurin sallittu säteilyteho.

Tämän tutkimuksen mittaukset suoritettiin GSM – ja UMTS-järjestelmiä ajatellen. Tulevaisuudessa tutkittuja ilmiöitä tulisi lisäksi tarkastella LTE – ja 5G-järjestelmien ja niiden käyttämien taajuuksien näkökulmasta.

LÄHTEET

- [1] European Commission, 2030 Energy Strategy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.12.2015): <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy/2030-energy-strategy>.
- [2] Euroopan parlamentti ja Euroopan Unionin neuvosto, Euroopan parlamentin ja neuvoston Direktiivi 2010/31/EU, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.12.2015): <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:FI:PDF>.
- [3] J. Niemelä, A. Asp, Y. Sydorovasp, Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa asuintaloissa, Tampereen teknillinen yliopisto, 2012, 61 s.
- [4] T. Toivonen, S. Kännälä, L. Puranen, Tukiasema-antennien asentaminen, Säteilyturvakeskus, 2014, 13 s.
- [5] T. Isotalo, J. Niemelä, J. Lempiäinen, Measurements for Distributed Antennas in WCDMA Indoor Network, Proceedings of WPMC2006, International Symposium of Wireless Personal Multimedia Communications, San Diego, California, USA, September 17-20, 2006, pp. 183-187.
- [6] J. Lempiäinen, M. Manninen, UMTS Radio Network Planning, Optimization and QoS Management for Practical Engineering Tasks, Kluwer Academic publishers, 2004, 342 p.
- [7] T. Isotalo, J. Lempiäinen, HSDPA Measurements for Indoor DAS, Vehicular Technology Conference, IEEE 65th, Dublin, Ireland, April 22-25, 2007, pp. 1127-1130.
- [8] S. Saunders, A. Zavala, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd, England, 2007, 511 p.
- [9] S. Heinonen, Studies on microwave antennas: Passive intermodulation distortion in antenna structures and design of microstrip antenna elements, Helsinki University of technology, 2005, 51 p.
- [10] P. L. Lui, Passive intermodulation interference in communication systems, Electronics and Communication Engineering Journal, vol. 2, no. 3, June, 1990, pp. 109-118.

- [11] V. Golikov, S. Hienonen, P. Vainikainen. Passive intermodulation distortion measurements in mobile communication antennas, Vehicular Technology Conference, IEEE VTS 54th, vol. 2, Atlantic City, New Jersey, USA, October 7-11, 2001, pp. 2623-2625.
- [12] Microwave Journal: Passive Intermodulation Characteristics, Microlab, verkkosivu. Saatavissa(viitattu 2.2.2016): <http://www.fxr.com/in-the-press/article/2e4d1ef8-d8f0-475d-b618-9b6776422793>.
- [13] J. D. Kraus, R. J. Marhefka, Antennas for all applications 3rd edition, The McMraw Hill Companies, New York, USA, 2003, 938 p.
- [14] M. Keskikastari, A. Baniya, A. Asp, PassiiviTele2 Loppuraportti, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015, 63 s.
- [15] D. Weinstein, Passive Intermodulation Distortion in Connectors, Cable and Cable Assemblies, Amphenol Corporation. Saatavissa(viitattu 18.1.2016): http://www.ieee.li/pdf/essay/passive_imd.pdf.
- [16] R. Hartman, T. Bell, Kaelus, PIM Test Power Levels For Mobile Communication Systems. Saatavissa (viitattu 18.1.2016): <http://www.kaelus.com/en/specials-folder/pdf-files/resource-center/white-papers/pim-test-methods-iec-recommendations-2012-final?ext=.pdf>.

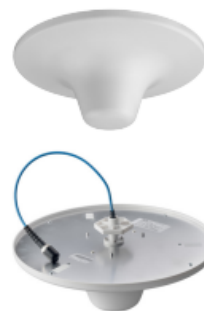
LIITE 1: GALTRONICS PEAR S5491I

PEAR™ S5491i Pigtail Broadband In-Building Antenna [380-6000 MHz]



Description:

Ceiling mount omni directional antenna for in-building applications such as DAS. The antenna is vertically polarized and operates at 380-6000 MHz supporting also public safety frequencies (TETRA).



Electrical Specifications						
Frequency Band [MHz]	380-520	698-790	790-960	1695-2200	2300-2700	2700-6000
Input Connector Type	N-Type or 4.3-10 DIN or 4.1-9.5 DIN Connector (F) with cable (12"/30 cm length)					
Polarization	Vertical					
Antenna Structure	Port 1					
Impedance	50 Ω					
VSWR/Return Loss	< 3:1/6.0dB	< 2:1/9.5dB	< 2:1/9.5dB	< 1.8:1/10.9dB	< 1.8:1/10.9dB	< 2.2:1/8.5dB
VSWR / Return Loss with 60x60cm ext. baseplate	<1.7:1/11.8 dB	<1.5:1/14.0 dB	<2.0:1/9.5 dB	<1.9:1/10.1 dB	<2.0:1/9.5 dB	<2.2:1/8.5 dB
Gain	0-1.5 dBi	1.5-2.5 dBi	2.0-3.5 dBi	5.0-7.0 dBi	4.0-7.0 dBi	5.0-6.0 dBi
Gain with 60x60cm ext. baseplate	2.0-4.0 dBi	1.5 – 3.5 dBi	3.0 – 4.0 dBi	5.0 – 7.0 dBi	4.0 – 7.0 dBi	5.0 – 6.0 dBi
Horizontal Beamwidth	Omni (360°)					
PIM @ 2x43 dBm	<-153 dBc for 4.3-10 DIN <-150 dBc for N-Type or 4.1-9.5 DIN					
Input Power	50 W at ambient temperature of 77° F (25° C)					

Operating Temperature	-40° to 158 °F (-40° to +70°C)
Environmental Conditions	Indoor
Antenna Weight	1.65 lbs (750g)
Antenna Dimensions (Diameter / Height)	13.2" / 4.88" (335 / 124mm)
Flammability rating	UL 94-V0
Radome Material	PC/ABS (halogen free)
RoHS	Compliant
Radome Color	RAL 9016 (white)*
Cable	Plenum Rated
Approved for use in Plenum Space	Listed & Tested by Intertek/ETL
Shipping Dimensions	16.7"x15.1"x10.4" / 425x385x265mm
Shipping Weight (Gross Weight)	5.73 lbs (2.6 Kg)

* Radome can be painted with recommended paint "Krylon fusion for plastic"

Release Date: 14, July 2015; Revision: C; Patent Pending

LIITE B: HUBER+SUHNER SENCITY ULTRA

HUBER+SUHNER® DATA SHEET Sencity Ultra Indoor: 1399.17.0120

Rev.: Q



SWA-0459/360/4/25/V_1

Description

Indoor DAS omni-directional antenna for In-Building Coverage
Ultra broad band, multi band
Ceiling mount
4 dBi gain
380 MHz up to 5875 MHz
AMPS, GSM, PCS, CDMA, UMTS, WiFi, WLAN 2.4 and 5.6 GHz, WiMAX, LTE
4.9 GHz Homeland Security, Tetra, Tetrapol, DVB-T, DVB-H



Product Configuration

Technical Data

Electrical Data

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
Frequency (MHz)	380 - 560	560 - 960	1710 - 5500	5500 - 5875
VSWR	2	2	1.5	1.5
Gain (dBi)	3.5	5	8	10

General Data

Nominal impedance 50 Ω
Polarisation vertical
Connector N, jack (female), back
Composite power max. 10 W
Requires a ground plane of min. 620 x 620 mm (included in antenna shipment) for 380 MHz to 690 MHz operation (please also refer to Mounting Instruction DOC-0000331648)

VSWR tested with ground plane and max. ceiling tile thickness of 15mm across 380 MHz to 5875 MHz

Mechanical Data

Dimensions (mm) 153.6 x 78.6 x 255 (Height x Width x Depth)
Weight 0.8 kg

Environmental Data

Environmental conditions indoor
Operation temperature (°C) 0 to 55
Storage temperature (°C) -40 to 80
Transport temperature (°C) -40 to 80
Flammability rating UL 94-HB
RoHS 2002/95/EC compliant
Lead-free soldered yes

Material Data

Radome colour RAL 9010 (white)
Radome material ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile)
Back plate/base plate colour RAL 9010 (white)
Back plate/base plate material Aluminium

Related Documents

Mounting instruction DOC-0000331648
Painting instruction DOC-0000256180
Security instruction DOC-0000278984

HUBER+SUHNER is certified according to ISO 9001 and ISO 14001

WAIVER
It is exclusively in written agreements that we provide our customers with warrants and representations as to the technical specifications and/or the fitness for any particular purpose. The facts and figures contained herein are carefully compiled to the best of our knowledge, but they are intended for general informational purposes only.

HUBER+SUHNER – Excellence in Connectivity Solutions

Document: DOC-0000334252 P

Issued: 07.09.11



HUBER+SUHNER AG
RF Industrial
9100 Herisau, Switzerland
Phone +41 (0)71 353 41 11
Fax +41 (0)71 353 45 90
www.hubersuhner.com

Uncontrolled Copy

LIITE C: KATHREIN 80010465



800 10465

Dual Band Indoor Directional Antenna

Integrated Combiner

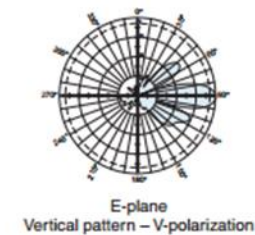
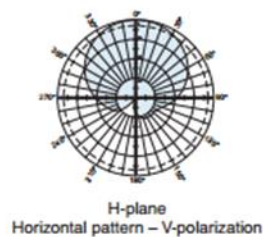
	Antenna 1	Antenna 2
Dual Band (MHz)	790–960	1710–2700
Single Polarization	V	V
HPBW	90°	90°
Electrical Downtilt	0°	0°

Specifications:

Frequency range	790–960 MHz and 1710–2700 MHz
Gain	7 dBi approx.
Impedance	50 ohms
VSWR	790–806 MHz < 2.2:1 806–960 MHz < 2.0:1 1710–2700 MHz < 2.0:1
Polarization	Vertical
Maximum input power	50 watts (at 50° C)
H-plane beamwidth	90 degrees approx. (half-power)
Connector	N female connector with 39 inch (1 m) RG-223/CU coax pigtail
Protection class	IP 30
Weight	1.1 lb (0.5 kg)
Dimensions	9 x 5.5 x 1.7 inches (231 x 140 x 50 mm)
Shipping dimensions	14.3 x 6 x 2.4 inches (363 x 152 x 62 mm)
Shipping weight	2 lb (0.9 kg)
Mounting	Mounting clip supplied

Order Information:

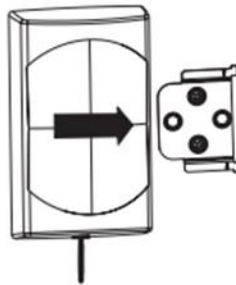
Model	Description
800 10465	Indoor antenna with N female connector with 39 inch (1 m) RG-223/CU coax pigtail



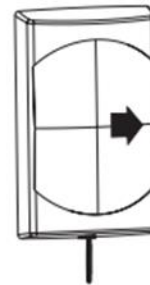
Mounting:



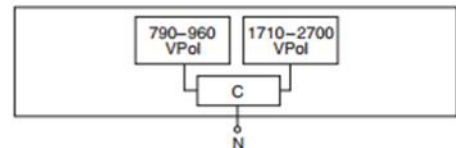
Mount the attachment plate to the wall using two screws of 4 mm diameter (not supplied) in the position as indicated.



Align the antenna over the attachment plate.



Pull the antenna to the stop.



All specifications are subject to change without notice.
The latest specifications are available at www.kathrein-scala.com.

Kathrein Inc., Scala Division Post Office Box 4580 Medford, OR 97501 (USA) Phone: (541) 779-6500 Fax: (541) 779-3991
Email: communications@kathrein.com Internet: www.kathrein-scala.com

LIITE D: KATHREIN 80010709

Indoor Multi-band Omni Antenna Dual Polarization

790–960

1710–2700

2500–2700

KATHREIN

Antennen · Electronic

V

H

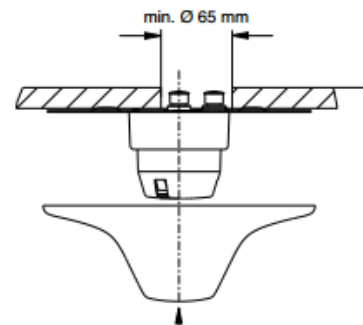
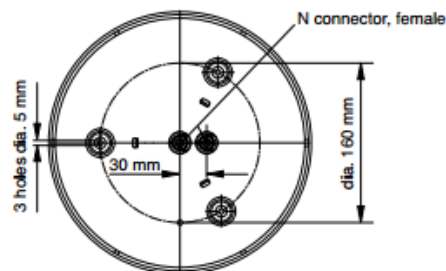
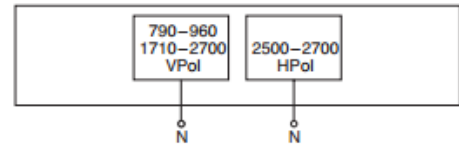
- The antenna can be operated in all frequency ranges simultaneously.
- The antenna needs no additional groundplane.

VHPol Indoor 790 – 960/1710–2700/2500–2700 360° 2dBi

Type No.	80010709	
Frequency range	790 – 960 MHz 1710 – 2700 MHz	2500 – 2700 MHz
Polarization	Vertical	Horizontal
Gain	~ 2 dBi	
Impedance	50 Ω	
VSWR	790 – 960 MHz: < 2.0 1710 – 2700 MHz: < 2.0	2500 – 2700 MHz: < 2.0
Isolation	> 30 dB	
Intermodulation IM3	< –140 dBc (2 x 40 dBm carrier)	
Max. power	50 W (at 50 °C ambient temperature)	
Input	2 x N female	
Protection class	IP 30	
Weight	Approx. 500 g	
Packing size	277 x 277 x 169 mm	
Diameter	258 mm	
Height	94 mm (without connector)	



- Material:** Reflector: Aluminum, Radome: High impact polystyrol, colour: White. Additional painting is possible.
- Mounting:** Three holes in the base enable a mounting on the ceiling. Two types of screws are supplied. For the N connectors a hole in the ceiling is required.
- Available accessories:** Broadband power splitters (694 – 3800 MHz) and tappers (694 – 2700 MHz).



Clip the protective housing into position after the antenna has been mounted with the help of the three supplied screws.

936.3783/a Subject to alteration.